

С.В. Мисюль



Ф И З И К А

**ПРАКТИКУМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВУЗОВ**

Учебное пособие

Красноярск 2004

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Красноярский государственный аграрный университет

С.В. Мисюль

Ф И З И К А

ПРАКТИКУМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВУЗОВ

*Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим
центром высшего профессионального образования для межвузовского
использования в качестве учебного пособия для студентов
технологических специальностей сельскохозяйственных вузов*

Красноярск 2004

ББК 22.3
УДК 53

Рецензенты:

*В.В. Слабко – заведующий кафедрой ВЭПОМ КГТУ,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
М.В. Горев – ведущий научный сотрудник Института
физики СО РАН, д-р физ.-мат. наук*

Мисюль, С.В.

Физика: Практикум для студентов технологических специальностей сельскохозяйственных вузов: Учеб. пособие / С.В. Мисюль: Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2004. – 76 с.

Практикум содержит основные формулы, справочные таблицы, подробно разобранные примеры решения типовых задач и 400 задач для самостоятельного решения по всем разделам физики. Уровень и набор задач соответствуют государственному стандарту по дисциплине "Физика" для студентов технологических специальностей сельскохозяйственных вузов.

Благодаря своей структуре, практикум может эффективно использоваться студентами в процессе аудиторной и самостоятельной работы, а также преподавателями при проведении контрольных работ, собеседований, зачетов и экзаменов. Пособие может быть рекомендовано также студентам заочной формы обучения.

ББК 22.3
УДК 53

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

© Мисюль С.В., 2004
© Красноярский государственный
аграрный университет, 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Раздел I. МЕХАНИКА.....	5
Раздел II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.....	15
Раздел III. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.....	23
Раздел IV. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.....	31
Раздел V. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	39
Раздел VI. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ	47
Раздел VII. ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ МЕХАНИКУ	57
Раздел VIII. ФИЗИКА АТОМОВ. АТОМНОЕ ЯДРО. РАДИОАКТИВНОСТЬ.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ	72
ЛИТЕРАТУРА	76

ВВЕДЕНИЕ

Цель преподавания физики в сельскохозяйственном вузе – ознакомить студентов с основными физическими представлениями о материальном мире, фундаментальными физическими понятиями, теориями и законами; научить студентов физическим принципам исследования химических, биологических и сельскохозяйственных объектов и измерения отдельных их характеристик; ознакомить студентов с основами аппарата физики, необходимого для решения теоретических и практических задач; привить студентам умение самостоятельно изучать учебную литературу по физике и ее приложениям; развить логическое мышление и повысить общий уровень культуры; выработать навыки исследования прикладных вопросов и умение перевести задачу на язык физической модели.

При изучении физики в сельскохозяйственном вузе большое значение имеет практическое применение теоретических знаний, главное из которых умение решать задачи.

Практикум содержит основные формулы, методические указания и задачи для самостоятельного решения по всем разделам физики. Задачи легко разделить на 10 вариантов по нескольким контрольным работам. Номер варианта выбирается по последней цифре учебного номера (шифра) студента, который приведен в его студенческом билете или зачетной книжке.

Если говорить о студентах-заочниках, то они должны выполнить в установленные сроки несколько контрольных работ. Количество контрольных работ и сроки их представления на кафедру определяются учебным планом университета.

Студентам-заочникам при выполнении контрольных работ необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Каждая контрольная работа должна быть выполнена в отдельной тетради.
2. На обложке следует разборчиво написать свою фамилию, инициалы и свой адрес, номер контрольной работы, вариант контрольной работы, шифр, название дисциплины и дату отправки в университет.
3. Решение задач необходимо приводить в той же последовательности, что и в данном пособии.
4. Перед решением задачи следует привести её полное условие.

5. Вникнув в условие задачи, выразить все данные в СИ и, где это только возможно, дать схематический чертеж, поясняющий содержание задачи.
6. Выяснив, какие физические законы лежат в основе данной задачи, решить ее в общем виде, т.е. выразить искомую физическую величину через заданные в задаче величины в буквенных обозначениях, без подстановки числовых значений в промежуточные формулы.
7. Проверив правильность общего решения, подставить числа в окончательную формулу и указать единицу искомой физической величины, проверив правильность ее размерности.
8. В конце задачи привести развернутый ответ, в котором все числа указывать с точностью до трех значащих цифр.
9. Контрольная работа должна быть оформлена аккуратно, написана разборчиво, без помарок и сокращений слов (кроме общепринятых сокращений).
10. Если по контрольной работе рецензентом сделаны замечания, студент должен учесть их и, не переписывая работы, внести необходимые исправления и дополнения.

Раздел I. МЕХАНИКА

При решении задач по кинематике и динамике поступательного движения необходимо обратить внимание на классические законы Ньютона и границы их применения. Решая задачи, связанные с работой и энергией, повторить определения этих понятий. Необходимо понять сущность различия задач, решаемых с применением закона сохранения энергии и закона сохранения импульса. Рассматривая задачи на вращательное движение, следует обратить внимание на аналогию законов вращательного и поступательного движений, на то, что момент инерции характеризует геометрию распределения масс и не зависит от момента силы, обратить внимание на закон сохранения момента импульса.

Основные законы и формулы

Скорость мгновенная

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \text{ или } v = \frac{dS}{dt}$$

Ускорение:
тангенциальное,
нормальное,

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

полное

$$a = \sqrt{a_{\tau}^2 + a_n^2}$$

Скорость угловая

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

Ускорение угловое

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$$

Уравнения равнопеременного
вращательного движения

$$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$$

$$\omega = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

Связь между линейными и угловы-
ми величинами, характеризующими
движение точки по окружности

$$S = \varphi r \quad v = \omega r$$

Второй закон Ньютона для посту-
пательного движения при $m = const$

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$$

Количество движения тела (им-
пульс)

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

Закон сохранения импульса для
изолированной системы тел

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$$

Работа переменной силы на пути S

$$A = \int_s F \cos \alpha ds$$

Мощность

$$N = \frac{dA}{dt} = F \cos \alpha ds$$

Кинетическая энергия тела

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$$

Закон сохранения механической
энергии

$$E = T + \Pi = const \quad E = \frac{mv^2}{2} + mgh = const$$

Момент инерции материальной
точки

$$I = ml^2$$

Момент инерции системы
материальных точек:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i l_i^2$$

полого и сплошного цилиндра
радиуса R ,

$$I_{0\text{полого}} = mR^2$$

$$I_{0\text{спл}} = \frac{mR^2}{2}$$

шара радиуса R ,

$$I_0 = \frac{2}{5} mR^2$$

стержня длины l

$$I_0 = \frac{1}{12} ml^2$$

Теорема Штейнера

$$I = I_0 + md^2$$

Момент силы относительно оси вращения

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$$

Основное уравнение динамики вращательного движения

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt}(I\vec{\omega})$$

То же при $I = const$

$$\vec{M} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = I\vec{\varepsilon}$$

Закон сохранения момента количества движения

$$\sum_{i=1}^n I_i \vec{\omega}_i = const$$

Кинетическая энергия вращающегося тела

$$T = \frac{I\omega^2}{2}$$

Работа при вращательном движении

$$dA = Md\varphi$$

Зависимость массы частицы от скорости

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E_0 = m_0 c^2$$

Энергия покоя частицы

Полная энергия частицы, движущейся со скоростью v , сравнимой со скоростью света

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$T = E - E_0 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Примеры решения задач

Пример 1. Тело массой 1 кг под действием постоянной силы движется прямолинейно. Зависимость пути, пройденного телом, от времени задано уравнением $s = 2t^2 + 4t + 1$. Определить работу силы за 10 с от начала её действия и зависимость кинетической энергии от времени.

Дано: $m = 1 \text{ кг}$; $s = 2t^2 + 4t + 1$.

Найти: A , $T = f(t)$

Решение:

Работа, совершаемая силой, $A = \int F ds$.

(1)

Сила, действующая на тело, по второму закону Ньютона равна:

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2S}{dt^2}. \quad (2)$$

Мгновенное ускорение определяется первой производной от скорости по времени или второй производной от пути по времени. В соответствии с этим:

$$v = \frac{dS}{dt} = 4t + 4 \quad a = \frac{dv}{dt} = 4 \frac{m}{c^2}. \quad (3-4)$$

$$\text{Тогда } F = m \frac{dv}{dt} = 4m. \quad (5)$$

$$\text{Из (3) находим } dS = v dt = (4t + 4) dt. \quad (6)$$

$$\text{Подставив (5) и (6) в уравнение (1), получим } A = \int_0^t 4m(4t + 4) dt.$$

По этой формуле вычислим работу, совершаемую силой за 10 с с начала её действия:

$$A = \int_0^{10} (16mt + 16m) dt = m \left[\frac{16t^2}{2} + 16t \right]_0^{10} = 1(8 \cdot 100 + 16 \cdot 10) = 960 \text{ Дж}.$$

$$\text{Кинетическая энергия равна } T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m(4t + 4)^2}{2} = 8m(t + 1)^2 = f(t).$$

$$\text{Ответ: } A = 960 \text{ Дж}, T = 8m(t + 1)^2.$$

Пример 2. Сплошной цилиндр массой 0,5 кг и радиусом 0,02 м вращается относительно оси, совпадающей с осью цилиндра, по закону $\varphi = 12 + 8t - 0,5t^2$. На цилиндр действует сила, касательная к поверхности. Определить эту силу и тормозящий момент.

$$\text{Дано: } m=0,5 \text{ кг}; \quad r=0,02 \text{ м}; \quad \varphi = 12 + 8t - 0,5t^2.$$

Найти: $F=?$ $M=?$

Решение: Цилиндр вращается относительно оси, совпадающей с его осью, по закону $\varphi = 12 + 8t - 0,5t^2$. Угловое ускорение определяется как вторая производная от угла поворота по времени:

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{d\omega}{dt},$$

где ω – угловая скорость, равная первой производной от угла по времени: $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$; т.е. $\omega = 8 - t$, тогда $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = -1 \text{ рад}/\text{с}^2$.

Момент силы относительно оси вращения: $\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]$. Или в скалярном виде: $M = Fr \sin \alpha$, т.к. сила действует касательно к поверхности,

$$\text{то } \sin \alpha = 1, \text{ тогда } M = Fr \text{ и } F = \frac{M}{r}. \quad (1)$$

Тормозящий момент можно определить из основного уравнения динамики вращательного движения: $M = I\varepsilon$, (2)

где I – момент инерции цилиндра, относительно оси вращения, т.к. ось вращения совпадает с осью цилиндра, то момент инерции его равен:

$$I = \frac{1}{2}mr^2. \quad (3)$$

Подставляем (3) в (2), имеем:

$$M = \frac{1}{2}mr^2\varepsilon; \quad M = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot (0,02)^2 \cdot (-1) \text{ рад/с}^2 = -1 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сила равна $F = \frac{M}{r} = -\frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,02} = -0,005 \text{ Н}.$

Ответ: $F = -0,005 \text{ Н}, M = -10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}.$

Пример 3. Определить импульс и кинетическую энергию электрона, движущегося со скоростью $0,7c$ (c – скорость света в вакууме).

Дано: $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; \quad v = 0,7c; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$

Найти: $P, T.$

Решение: Импульсом частицы называется произведение массы частицы на скорость её движения: $P = mv.$ (1)

Так как скорость электрона близка к скорости света, то необходимо учесть зависимость массы от скорости, определяемую по формуле:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2)$$

где m – масса движущей частицы, m_0 – масса покоящейся частицы.

Подставляя (2) в (1), получим:

$$P = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c \beta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3)$$

Учтем, что $\beta = \frac{v}{c} = 0,7.$

Сделаем подстановку числовых значений, входящих в формулу (3):

$$P = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{0,7}{\sqrt{1 - 0,49}} = 2,675 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Кинетическая энергия T в релятивистской механике определяется как разность между полной энергией частицы $E = mc^2$ и её энергией покоя $E_0 = m_0c^2$, т.е. с учётом (2):

$$T = E - E_0 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right). \quad (4)$$

Найдём численное значение T , подставив числовые данные в формулу (4):

$$T = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,49}} - 1 \right) = 81,9 \cdot 10^{-15} \cdot 0,4 = 3,28 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Ответ: $P = 2,675 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$, $T = 3,28 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$

Задачи для самостоятельного решения

1. При прямолинейном движении тела массой 1 кг изменение его координаты со временем происходит по закону $x = 5t - 10t^2$. Найти силу, действующую на тело.

2. Тело массой 3 кг движется с ускорением, изменяющимся по закону $a = 10t - 10$, $v_0 = 0$. Определить силу, действующую на тело через 3 с после начала её действия, и скорость тела в конце третьей секунды.

3. Тело движется под действием постоянной силы 15 Н . Зависимость координаты от времени имеет вид $x = 10 - 5t + 2t^2$. Найти массу тела.

4. Найти зависимость скорости от времени и силу, действующую на тело массой $0,1 \text{ кг}$ в конце третьей секунды, если координата со временем изменяется по закону $x = 2t - t^2 + 3t^3$.

5. Тело массой 2 кг движется со скоростью, зависимость которой от времени выражается уравнением $v = 2,5t^2 + 10t$. Определить путь, пройденный телом за 5 с , и силу, действующую на тело в конце пятой секунды.

6. Сплошной шарик массой 400 г и радиусом 5 см вращается вокруг своей оси, проходящей через его центр. Закон вращения шара имеет вид: $\varphi = 4 + 2t - 2t^2$. Определить вращающий момент.

7. Стержень массой 1 кг и длиной 1 м вращается вокруг своей оси, проходящей через один из его концов по закону $\varphi = 2 + t + t^2$. Определить момент силы, действующий на другой его конец.

8. Сплошной диск массой $0,2 \text{ кг}$ вращается вокруг своей оси, проходящей через центр его масс под действием момента сил $0,8 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м}$. Закон вращения имеет вид $\varphi = 5 - t + 2t^2$. Определить радиус диска.

9. Полый цилиндр вращается относительно оси, совпадающей с осью цилиндра. Закон вращения имеет вид: $\varphi = 10 - 5t + 0,5t^2$. Определить момент инерции и массу цилиндра, если его радиус $0,05$ м. Момент силы относительно оси вращения, действующей на цилиндр, равен $0,75$ Н·м.

10. Шар и сплошной цилиндр имеют одинаковую массу 5 кг и катятся с одинаковой скоростью 10 м/с. Найти кинетические энергии этих тел.

11. Масса движущегося протона $2,25 \cdot 10^{-27}$ кг. Найти скорость и кинетическую энергию протона.

12. Электрон прошёл ускоряющую разность потенциалов 100 МВ. Во сколько раз его релятивистская масса больше массы покоя? Вычислить его полную и кинетическую энергии.

13. Определить скорость протона, если его релятивистская масса в три раза больше массы покоя. Вычислить кинетическую и полную энергии.

14. Вычислить скорость, полную и кинетическую энергии протона в тот момент, когда его масса равна массе α -частицы ($m_{0\alpha} = 6,44 \cdot 10^{-27}$ кг).

15. Найти импульс, полную и кинетическую энергии электрона, движущегося со скоростью, равной $0,9$ с.

16. Протон прошёл ускоряющую разность потенциалов, после чего его масса стала равна половине массы α -частицы ($m_{0\alpha} = 6,44 \cdot 10^{-27}$ кг). Определить разность потенциалов.

17. С какой скоростью движется электрон, если его кинетическая энергия равна $1,78$ МэВ? Определить импульс электрона.

18. Кинетическая энергия частицы оказалась равной её энергии покоя. Какова скорость этой частицы?

19. При какой скорости масса любой частицы вещества в 5 раз больше его массы покоя?

20. Во сколько раз масса движущегося электрона, обладающего кинетической энергией 1 МэВ, больше его массы покоя?

21. Сплошной цилиндр массой 10 кг катится без скольжения с постоянной скоростью 10 м/с. Определить кинетическую энергию цилиндра и время его остановки, если на него подействует сила 50 Н.

22. Стержень массой 2 кг и длиной 1 м может вращаться вокруг оси, проходящей через его середину перпендикулярно стержню. В конец стержня попадает пуля массой 10 г, летящая перпендикулярно

оси и стержню со скоростью 500 м/с . Определить угловую скорость, с которой начнет вращаться стержень, если пуля застрянет в нем.

23. Сплошной шар скатывается по наклонной плоскости, длина которой 10 м и угол наклона 30° . Определить скорость шара в конце наклонной плоскости.

24. Полый цилиндр массой 2 кг катится по горизонтальной поверхности со скоростью 20 м/с . Определить силу, которую необходимо приложить к цилиндру, чтобы остановить его на пути $1,6 \text{ м}$.

25. Маховик, имеющий форму диска массой 30 кг и радиусом 10 см , был раскручен до частоты 300 мин^{-1} . Под действием силы трения диск остановился через 20 с . Найти момент силы трения, считая его постоянным.

26. Автомобиль массой 5 т движется равнозамедленно, при этом в течение десяти секунд его скорость уменьшается от 72 км/ч до 54 км/ч . Найти силу торможения.

27. Тело массой 1 кг под действием постоянной силы движется прямолинейно. Зависимость пути, пройденного телом, от времени выражается уравнением $s = t^2 + 2t + 2$. Определить работу силы за 5 с после начала её действия.

28. В каком случае двигатель автомобиля совершит большую работу (во сколько раз): разгон с места до скорости 36 км/ч или увеличение скорости от 36 км/ч до 72 км/ч ? Силу сопротивления и время движения в обоих случаях считать одинаковыми.

29. Тело массой 2 кг под действием постоянной силы движется и зависимость пути, пройденного телом, от времени выражается уравнением $s = t^2 + 2t + 2$. Найти зависимость кинетической энергии от времени и её значение в конце второй секунды.

30. Найти силу тяги, развиваемую мотором автомобиля, движущегося в гору с ускорением 1 м/с^2 . Уклон горы равен 1 м на каждые 25 м пути. Масса автомобиля $9,8 \cdot 10^2 \text{ кг}$. Коэффициент трения равен $0,1$.

Качественные задачи

31. Зависимость пройденного пути от времени $s(t)$ для двух материальных точек, движущихся прямолинейно, представлена кривыми 1 и 2 (рис.). Спрашивается, какая кривая соответствует возрастанию скорости точки, а какая – убывающей скорости?

32. Поперек реки, скорость течения которой \vec{v} , плывет лодка.

Скорость лодки относительно воды направлена под углом к линии, перпендикулярной течению реки. Под каким углом относительно той же линии движется лодка?

33. Материальная точка движется по спирали. При этом нормальное ускорение постоянно: $a_n = const$. Как изменяются линейная и угловая скорости?

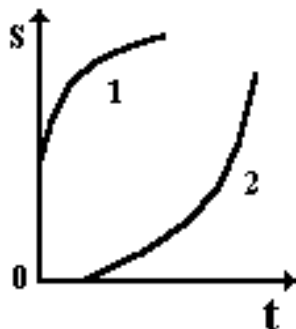


Рис. 1

34. В какую сторону вдоль оси вращения Земли направлен вектор угловой скорости при суточном её вращении ?

35. Вектор угловой скорости диска направлен на восток при вращении относительно горизонтальной оси. Указать направление линейной скорости точек обода диска ?

36. Пуля массой m , летящая горизонтально, попадает в подвешенный на шнуре предмет массы M . При этом возможны три случая: 1) пуля застревает в предмете, 2) пуля пробивает предмет и сохраняет только часть своей энергии, 3) пуля после удара отскакивает от предмета. В каком из этих случаев предмет поднимется на большую высоту и в каком — на наименьшую?

37. Зависит ли скорость тела у основания наклонной плоскости от угла, который она составляет с горизонтом при наличии трения или без него, при скатывании этого тела без начальной скорости?

38. Два шара одинаковой массы сталкиваются (абсолютно упругий удар), испытывая нецентральный удар. Доказать, что угол между направлениями скоростей шаров после удара составляет угол 90° ?

39. Зависимость потенциальной энергии тел от их положения изображается параболой $W_p = bx^2$. По какому закону изменяются силы, действующие на эти тела?

40. У вертолетов, кроме несущего винта, на хвостовой части имеется дополнительный винт. Поясните, зачем нужен этот винт?

41. Как можно найти емкость сосуда, используя только весы и набор гирь?

42. Цилиндрический стакан до краёв наполнен жидкостью. Каким образом содержимое стакана разделить на две равные части, имея меньший сосуд произвольной формы?

43. Определите диаметр мяча линейкой.

44. Автомобиль спускается с горы с выключенным двигателем. За счет какой энергии движется автомобиль при этом?

45. Два шара разной массы, имеющие одинаковые кинетические энергии, летят навстречу друг другу. В какую сторону они полетят после абсолютно неупругого столкновения? Удар лобовой.

46. Можно ли по графику зависимости пути от времени найти среднюю скорость движения материальной точки по траектории?

47. Изменится ли ускорение машины, если она совершает крутой поворот с постоянной скоростью, по сравнению с ее ускорением на закруглении большего радиуса ?

48. Чем отличается кинетическая энергия вращательного движения тела от кинетической энергии его поступательного движения?

49. Почему контактный провод трамвайной линии всегда идет зигзагом, а не параллельно рельсам?

50. Под каким углом разлетятся два одинаковых упругих шара после центрального удара, если один из них до удара покоился?

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику основных физических понятий кинематики.
2. Назовите четыре типа взаимодействий современной физики.
3. Чем характеризуется положение материальной точки в пространстве?
4. В чем различие вектора перемещения и расстояния, пройденного материальной точкой по траектории при ее движении?
5. Физический смысл мгновенной скорости. Как направлен вектор мгновенной скорости?
6. Физический смысл мгновенного ускорения. Как направлен вектор мгновенного ускорения?
7. Физический смысл нормального, тангенциального, полного ускорения. Как направлено каждое из них?
8. В чем заключается физический смысл угловой скорости?
9. Как связаны линейная и угловая скорости в векторном виде?
10. Что такое сила?
11. Что такое импульс материальной точки (тела)?

12. Сформулируйте закон всемирного тяготения и его границы применения.
13. Преобразования Галилея и принцип относительности.
14. Принцип независимости действия сил.
15. Что такое энергия?
16. Что такое кинетическая энергия и как она связана с работой?
17. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
18. Сформулируйте теорему Штейнера-Гюйгенса.
19. Сформулируйте закон сохранения вектора момента импульса.
20. Запишите формулу работы при вращательном движении тел.

Раздел II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Решая задачи на применение уравнения Клапейрона-Менделеева, не следует забывать, что данное уравнение описывает состояние идеального газа. Кроме этого надо помнить, что все применяемые в этом разделе физические величины имеют статистический характер. Полезно, приступая к решению задач, нарисовать эскизно график процесса, с подходящими переменными по координатным осям.

Основные законы и формулы

Количество вещества

$$\nu = \frac{m}{M} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{N}{N_A}$$

Уравнение Клапейрона-Менделеева
(уравнение состояния идеального газа)

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Закон Дальтона

$$P_0 = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A}{M} \rho$$

Уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$P = \frac{1}{3} n_0 m_0 \langle v_0^2 \rangle = \frac{2}{3} n_0 \langle \varepsilon_0 \rangle$$

Средняя кинетическая энергия одной молекулы идеального газа (внутренняя энергия)

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = U_0 = \frac{i}{2} kT$$

Внутренняя энергия массы идеального газа

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT$$

Уравнение Майера

$$C_p - C_v = R$$

Теплоёмкость молярная и её связь с удельной

$$C_p = \frac{i+2}{2} R ; \quad C_p = Mc_p$$

$$C_v = \frac{i}{2} R ; \quad C_v = Mc_v$$

Первое начало термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A$$

$$dU = \frac{m}{M} C_v dT ; \quad \delta A = pdV$$

Работа расширения газов в процессах:

адиабатном

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right\}$$

изотермическом

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

изобарном

$$A = PdV = \frac{m}{M} R dT$$

Уравнение Пуассона, связывающее параметры газа в адиабатном процессе

$$PV^\gamma = const ; \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$$

Изменение энтропии

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int \frac{dQ}{T}$$

Термический КПД цикла Карно

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Примеры решения задач

Пример 1. Кислород массой 320 г нагревают при постоянном давлении от 300 К до 310 К. Определить количество теплоты, поглощенное газом, изменение внутренней энергии и работу расширения газа.

Дано: $m=320 \text{ г}=0,32 \text{ кг}$; $T_1=300 \text{ К}$; $T_2=310 \text{ К}$.

Найти: $Q, \Delta U, A$.

Решение: Количество теплоты, необходимое для нагревания газа при постоянном давлении определим, используя I-е начало термодинамики:

$$Q = \frac{m}{M} C_p (T_2 - T_1). \quad (1)$$

Здесь C_p – молярная изобарная теплоёмкость; M – молярная масса газа; $C_p = \frac{i+2}{2} R$, где $i = 5$ для кислорода, как двухатомного газа; $M=32 \text{ кг/кмоль}$.

Подставляя в (1) числовые значения, получим:

$$Q = \frac{32 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \text{ кг / кмоль}} \cdot \frac{7}{2} \cdot 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} (310 - 300) \text{ К} = 2910 \text{ Дж} .$$

Изменение внутренней энергии газа:

$$\Delta U = \frac{m}{M} C_v (T_2 - T_1) . \quad (2)$$

Подставляя числовые значения и учтя, что $C_v = \frac{i}{2} R$, получим

$$\Delta U = \frac{32 \cdot 10^{-2}}{32 \text{ кг / кмоль}} \cdot \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \cdot 10 \text{ К} = 2080 \text{ Дж} .$$

Работа расширения газа при изобарном процессе:

$$A = P \Delta V , \quad (3)$$

где $\Delta V = V_2 - V_1$ – изменение объёма газа при расширении можно найти из уравнения Клапейрона-Менделеева. Для двух состояний газа при

$$\text{изобарном процессе: } P_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1 , \quad (4)$$

$$P_2 V_2 = \frac{m}{M} R T_2 . \quad (5)$$

Тогда, вычитая почленно (5) из (4), получим $P(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$ и,

подставляя это в (3), находим:

$$A = \frac{32 \cdot 10^{-2} \text{ кг}}{32 \text{ кг / кмоль}} \cdot 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} (310 - 300) \text{ К} = 830 \text{ Дж} .$$

Проверка: $Q = \Delta U + A$; $2910 \text{ Дж} = (2080 + 830) \text{ Дж}$.

Ответ: $Q = 2910 \text{ Дж}$; $\Delta U = 2080 \text{ Дж}$; $A = 830 \text{ Дж}$.

Пример 2. Найти среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 350 \text{ К}$, а также кинетическую энергию вращательного движения всех молекул кислорода массой 4 г .

Дано: $T = 350 \text{ К}$; $m = 4 \text{ г} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$; $M = 32 \text{ кг/кмоль}$

Найти: $\langle \varepsilon_{вр} \rangle_0$; $E_{квр}$.

Решение: На каждую степень свободы молекулы газа приходится одинаковая средняя энергия $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{i}{2} kT$, где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура газа. Так как вращательному движению двухатомной молекулы O_2 соответствуют две степени свободы, то средняя энергия вращательного движения молекулы кислорода бу-

$$\text{дет } \langle \varepsilon_{вр} \rangle_0 = 2 \frac{1}{2} kT . \quad (1)$$

Подставив в (1) значения $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К и $T = 350$ К, получим $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle_0 = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К $\cdot 350$ К = $4,83 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул газа определяется $E_{\text{квр}} = N \cdot \langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle_0$. (2)

Число всех молекул N газа вычислим по формуле $N = N_A \nu$, (3)
где N_A – число Авогадро; $\nu = m/M$ – количество вещества.

Подставив это в (3), получим $N = N_A \cdot m/M$.

Теперь подставим это в (2): $E_{\text{квр}} = N \cdot \langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle_0 = N_A \cdot (m/M) \cdot \langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle_0$.

Подставив численные значения, получим:

$$E_{\text{квр}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 4,83 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / (32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}) = 364 \text{ Дж}.$$

Ответ: $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle_0 = 4,83 \cdot 10^{-21}$ Дж; $E_{\text{квр}} = 364$ Дж.

Пример 3. Как изменится энтропия 2 г водорода, занимающего объем 40 л при температуре 270 К, если давление увеличить вдвое при постоянной температуре, а затем повысить температуру до 320 К при постоянном объёме?

Дано: $m = 2$ г = $2 \cdot 10^{-3}$ кг; $M = 2$ кг/кмоль; $V = 40$ л = $4 \cdot 10^{-2}$ м³; $T_1 = 270$ К; $T_2 = 320$ К; $P_2 = 2P_1$.

Найти: ΔS .

Решение: Изменение энтропии определяется формулой: $\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$,

где dQ – количество теплоты, полученное в данном процессе.

Изменение энтропии согласно условию происходит за счет двух процессов: 1) изотермического и 2) изохорного. Тогда:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \int_1^2 \frac{dQ_1}{T} + \int_1^2 \frac{dQ_2}{T}.$$

Количество теплоты dQ_1 и dQ_2 найдем из I-го начала термодинамики для этих процессов: $dQ = \frac{m}{M} C_v dT + PdV$.

1) $dQ_1 = PdV$ (т.к. $dT = 0$ для $T = \text{const}$). P найдем из уравнения Клапейрона-Менделеева: $PV = \frac{m}{M} RT$, тогда $dQ_1 = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} dV$ и

$$\Delta S_1 = \int_1^2 \frac{m}{M} \frac{R}{V} dV = \frac{m}{M} R \int_1^2 \frac{dV}{V} = \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} R \ln \frac{P_1}{P_2}, \text{ т.к. при } T = \text{const}, P_1 V_1 = P_2 V_2;$$

$$2) \quad dQ_2 = \frac{m}{M} C_v dT \quad (\text{т.к. } dV = 0 \text{ и } dA = 0 \text{ при } V = \text{const}); \quad dQ_2 = \frac{m}{M} \frac{5}{2} R dT \quad \text{и}$$

$$\Delta S_2 = \int_1^2 \frac{m}{M} \frac{5}{2} R \frac{dT}{T} = \frac{m}{M} \frac{5}{2} R \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad \Delta S = \frac{m}{M} R \left(\ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{5}{2} \ln \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Подставляя численные значения, получим:

$$\Delta S = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 8,31 \cdot 10^3 \left(-\ln 2 + \frac{5}{2} \ln \frac{320}{270} \right) = -2,27 \text{ Дж/К}.$$

Ответ: $\Delta S = -2,27 \text{ Дж/К}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. В баллоне ёмкостью 10 л находится сжатый воздух при температуре 27°C . После того как часть воздуха выпустили, давление понизилось на $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Определить массу выпущенного воздуха. Процесс считать изотермическим.

2. Какой объём занимает при нормальных условиях смесь 4 кг гелия и 4 кг азота?

3. В сосуде, имеющем форму шара, радиус которого $0,2 \text{ м}$, находится 80 г азота. До какой температуры можно нагреть сосуд, если его стенки выдерживают давление $7 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

4. При температуре 27°C и давлении $12 \cdot 10^5 \text{ Па}$ плотность смеси водорода и азота 10 г/дм^3 . Определить молярную массу смеси.

5. В баллоне ёмкостью 5 л находится 2 кг водорода и 1 кг кислорода. Определить давление смеси, если температура окружающей среды 7°C .

6. Давление идеального газа 2 МПа , концентрация молекул $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы и температуру газа.

7. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы двухатомного газа, если суммарная кинетическая энергия молекул в 1 кмоль этого газа $6,02 \text{ Дж}$.

8. Найти среднюю кинетическую энергию вращательного движения всех молекул, содержащихся в $0,25 \text{ г}$ водорода при температуре 27°C .

9. Определить концентрацию молекул идеального газа при температуре 350 К и давлении $1,0 \text{ МПа}$.

10. Определить температуру идеального газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул $2,8 \cdot 10^{-19}$ Дж.

11. Найти увеличение внутренней энергии и работу расширения 30 г водорода при постоянном давлении, если его объем увеличился в пять раз. Начальная температура 270 К.

12. Азот массой 1 кг, находящийся при температуре 300 К, сжимают: а) изотермически; б) адиабатно, увеличивая давление в десять раз. Определить работу, затраченную на сжатие в обоих случаях. Какое количество теплоты нужно сообщить 1 моль кислорода, чтобы он совершил работу 10 Дж: а) при изотермическом процессе; б) при изобарном?

13. Определить, какое количество теплоты необходимо сообщить углекислому газу массой 440 г, чтобы нагреть его на 10 К: а) изохорно, б) изобарно.

14. При нагревании $0,5$ кмоль азота было передано 1000 Дж теплоты. Определить работу расширения при постоянном давлении.

15. Газ, занимающий объем 10 л под давлением $0,5$ МПа, был изобарно нагрет от 323 до 473 К. Найти работу расширения газа.

16. Газ занимает объем 12 л под давлением $0,2$ МПа. Определить работу, совершенную газом, если он изобарно нагревается от 300 до 348 К.

17. Найти работу и изменение внутренней энергии при адиабатном расширении $0,5$ кг воздуха, если его объем увеличится в пять раз. Начальная температура 17 °С.

18. Определить количество теплоты, сообщенное 14 г азота, если он был изобарически нагрет от 37 до 187 °С. Какую работу он совершит и как изменится его внутренняя энергия?

19. Во сколько раз увеличится объем 2 моль водорода при изотермическом расширении при температуре 27 °С, если при этом была затрачена теплота 8 кДж.

20. Определить молярную массу газа, если при изохорном нагревании на 10 °С 20 г газа потребуется 680 Дж теплоты, а при изобарном 1050 Дж.

21. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изохорном нагревании от 250 до 800 К?

22. При изобарном расширении водорода массой 20 г его объем увеличился в три раза. Определить изменение энтропии водорода при этом процессе.

23. При изохорном нагревании 480 г кислорода давление увеличилось в 5 раз. Найти изменение энтропии в этом процессе.

24. Объем гелия, массой 1 кг , увеличился в 4 раза: а) изотермически; б) адиабатно. Каково изменение энтропии в этих процессах?

25. Найти изменение энтропии при нагревании 1 кг воды от 0 до 100°C и последующем превращении ее в пар, при той же температуре.

26. Как изменится энтропия при изотермическом расширении $0,1 \text{ кг}$ кислорода, если при этом объем изменится от 5 до 10 л ?

27. Определить изменения энтропии при изобарном нагревании $0,1 \text{ кг}$ азота от 17 до 97°C .

28. Лед, находящийся при температуре -30°C , превращается в пар. Определить изменения энтропии в этом процессе.

29. Чему равно изменение энтропии 10 г воздуха при изобарном расширении от 3 до 8 л ?

30. Чему равно изменение энтропии 20 г воздуха при изобарном охлаждении от 300 до 250 К ?

Качественные задачи

31. Объем газа уменьшили в 3 раза, а температуру увеличили в 2 раза. Во сколько раз увеличилось давление газа? Газ считать идеальным.

32. Сжатую пружину растворили в кислоте. На что пошла потенциальная энергия упругой деформации пружины?

33. Предлагаем два варианта объяснения подъемной силы воздушного шара, наполненного водородом. Согласно первому – подъемная сила есть сила Архимеда. Согласно второму – подъемная сила возникает из-за разности в давлении на верхнюю и нижнюю части шара. Чем различаются эти объяснения?

34. Объясните, почему изотермическое расширение газа возможно только при подведении к нему количества теплоты?

35. Существует ли процесс, при котором все переданное рабочему телу от нагревателя тепло превращается в полезную работу?

36. Можно ли всю внутреннюю энергию газа превратить в механическую работу?

37. Почему КПД двигателя внутреннего сгорания резко падает при взрывном сгорании горючей смеси?

38. Как изменится температура в помещении, если дверцу работающего холодильника оставить открытой?

39. При нагревании двухатомного газа его теплоемкость в области высоких температур имеет резкий рост с последующим спадом. Аналогичная зависимость наблюдается и у многоатомных газов. Чем это объяснить?

40. Некоторый газ переходит из I-го во II-е состояния сначала по изохоре, а затем по изобаре. В другом случае сначала по изобаре, затем по изохоре. Будет ли в обоих случаях совершена одинаковая работа?

41. Почему нагревается насос при накачивании шины колеса автомобиля?

42. Почему металл и дерево одной и той же температуры на ощупь кажутся неодинаково нагретыми?

43. Можно ли вскипятить воду в бумажном стаканчике?

44. Почему капли воды на раскаленной плите “живут” дольше, чем на просто горячей?

45. Почему перед закипанием вода в чайнике “шумит”?

46. Почему вода в сосуде с крышкой закипает быстрее, чем без крышки?

47. Может ли воздушный шар в атмосфере Земли подняться на неограниченную высоту?

48. Кусок льда плавает в наполненном до краев сосуде с водой. Перельется ли вода через край, если лед растает?

49. Почему деревянный карандаш плавает в воде горизонтально? Объясните, почему он будет плавать вертикально, если к одному из его концов прикрепить груз?

50. Одинаковые свинцовые шарики опускают в равные по объему сосуды с водой. В одном сосуде температура воды 5°C , а в другом – 50°C . В каком сосуде шарик быстрее достигнет дна?

Контрольные вопросы

1. Что такое атом, молекула, ион?
2. Что называют термодинамической системой?
3. Что такое параметры состояния?
4. Какое состояние термодинамической системы называют равновесным, неравновесным?
5. Что такое идеальный газ?

6. Что характеризует уравнение состояния?
7. Дайте определение закона распределения Максвелла.
8. В чем заключается закон распределения Больцмана?
9. Что характеризует наиболее вероятная скорость?
10. Чему равна средняя арифметическая скорость?
11. Что такое теплота?
12. Дайте определение первого начала термодинамики.
13. Какие вы знаете изопроцессы?
14. Что представляет собой изотермический процесс?
15. Как вычислить работу газа изохорического и изобарического процессов?
16. Дайте определение адиабатического процесса.
17. Какие физические параметры связывает уравнение Майера?
18. Что такое теплоемкость тела, удельная и молярная теплоемкости?
19. О чем говорит второе начало термодинамики?
20. Как повысить КПД тепловой машины?

Раздел III. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Перед решением задачи по электростатике полезно будет нарисовать схему расположения зарядов и силы, действующие на заряды. Следует также помнить, что напряженность \vec{E} электрического поля есть его силовая характеристика, т.е. \vec{E} – вектор, а потенциал φ электрического поля – энергетическая характеристика, т.е. φ – скаляр. При решении задач на постоянный ток необходимо обратить особое внимание на составление схемы электрической цепи.

Основные законы и формулы

Закон Кулона

$$F = Q_1 Q_2 / (4 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2)$$

Напряженность электрического поля:

$$\vec{E} = \vec{F} / Q_0$$

бесконечно длинной заряженной нити

$$E = \tau / (2 \pi \epsilon \epsilon_0 r)$$

точечного заряда

$$E = Q / (4 \pi \epsilon \epsilon_0 r^2)$$

равномерно заряженной плоскости

$$E = \sigma / (2 \epsilon \epsilon_0)$$

между двумя равномерно и разноименно

$$E = \sigma / (\epsilon \epsilon_0)$$

заряженными бесконечными параллель-

ными плоскостями

плоского конденсатора
создаваемого металлической заряженной
сферой на расстоянии r от ее центра
Работа перемещения заряда в электриче-
ском поле

$$E = U/d$$
$$E = Q/(4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2)$$

$$A = Q \int_1^2 E_l dl; \quad A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Потенциал поля, создаваемого точечным
зарядом

$$\varphi = Q/(4\pi\epsilon\epsilon_0 r)$$

Связь потенциала с напряженностью
поля

$$\vec{E} = -grad \varphi$$

Сила притяжения между двумя разно-
именно заряженными обкладками кон-
денсатора

$$F = \epsilon\epsilon_0 E^2 S/2 = Q^2/(2\epsilon\epsilon_0 S)$$

Емкость:

уединенного проводника
плоского конденсатора

$$C = Q/\varphi$$
$$C = Q/U; \quad C = \epsilon\epsilon_0 S/d$$

Емкость батареи конденсаторов,
соединенных параллельно
последовательно

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Энергия поля:
заряженного проводника

$$W = C\varphi^2/2 = Q^2/2C = Q\varphi/2$$

заряженного конденсатора
Объемная плотность энергии электриче-
ского поля

$$W = \epsilon\epsilon_0 E^2 V/2$$
$$W = \epsilon\epsilon_0 E^2/2 = ED/2 =$$
$$D^2/(2\epsilon\epsilon_0)$$

Сила тока
Закон Ома для замкнутой (полной) цепи

$$I = dQ/dt$$
$$I = E/(R+r)$$

Закон Ома в дифференциальной форме
Закон Джоуля-Ленца

$$\vec{j} = \gamma\vec{E} = \vec{E}/\rho$$
$$Q = I^2 R t = U^2 t/R$$

Сопротивление однородного проводника

$$R = \rho l/S$$

Удельная проводимость

$$\gamma = 1/\rho$$

Зависимость удельного сопротивления
от t^0

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

Примеры решения задач

Пример 1. Заряд 1 нКл переносится в воздухе из точки, находящейся на расстоянии 1 м от бесконечно длинной равномерно заряженной нити, в точку на расстоянии 10 см от нее. Определить работу, совершаемую против сил поля, если линейная плотность нити 1 мкКл/м .

Дано: $R_0 = 0,1 \text{ м}; R_1 = 1 \text{ м}; Q = 10^{-9} \text{ Кл}; \varepsilon = 1; \tau = 10^{-6} \text{ Кл/м}$.

Найти: A .

Решение: Работа A внешней силы по перемещению заряда Q из точки поля с потенциалом φ_1 и точку с потенциалом φ_0 равна

$$A = Q(\varphi_0 - \varphi_1). \quad (1)$$

Бесконечная равномерно заряженная нить с линейной плотностью заряда τ создает поле напряженностью $E = \tau / (2 \varepsilon \varepsilon_0 r)$. Напряженность и потенциал поля связаны соотношением $E = -d\varphi/dr$, откуда $d\varphi = -E dr$.

Разность потенциалов на расстоянии r_1 и r_0 от нити $\varphi_0 - \varphi_1 = - \int_{r_1}^{r_0} E dr = - \tau / (2 \pi \varepsilon \varepsilon_0) \int_{r_1}^{r_0} dr/r = \tau / (2 \pi \varepsilon \varepsilon_0) \ln r_1/r_0$. (2)

Подставляя (2) в формулу (1), определим работу

$$A = Q \tau / (2 \pi \varepsilon \varepsilon_0) \ln r_1/r_0 = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м} \cdot 2,30}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}} = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Ответ: $A = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$.

Пример 2. В медном проводнике сечением 6 мм^2 и длиной 5 м течет ток. За 1 мин в проводнике выделяется 18 Дж теплоты. Определить напряженность поля, плотность и силу электрического тока в проводнике.

Дано: $S = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; l = 5 \text{ м}; t = 60 \text{ с}; Q = 18 \text{ Дж}; \rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Найти: $E; j; I$.

Решение: Для решения задачи используем закон Ома в дифференциальной форме, закон Джоуля-Ленца и формулы для сопротивления проводника

$$j = \gamma E = E/\rho; \quad Q = I^2 R t; \quad R = \rho l/S, \quad (1-3)$$

где $j = I/S$ – плотность тока; E – напряженность поля; $\gamma = \rho^{-1}$ – удельная проводимость; I – сила тока; t – время; ρ, l, S – удельное сопро-

тивление, длина и площадь поперечного сечения проводника, соответственно.

Из формул (1–3) находим

$$I = \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{Rt}} = \frac{\sqrt{QS}}{\sqrt{\rho lt}} = \frac{\sqrt{18 \text{ Дж} \cdot 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}}{\sqrt{1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м} \cdot 5 \text{ м} \cdot 60 \text{ с}}} = 4,6 \text{ А.}$$

$$j = \frac{I}{S} = 4,6 \text{ А} / (6 \cdot 10^{-6}) = 7,7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2.$$

$$E = j \rho = 7,7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{ м} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ В/м.}$$

Ответ: $E = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$; $j = 7,7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$; $I = 4,6 \text{ А}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. В вершинах квадрата со стороной $0,1 \text{ м}$ помещены заряды по $0,1 \text{ нКл}$. Определить напряженность и потенциал поля в центре квадрата, если один из зарядов отличается по знаку от остальных.

2. Пространство между двумя параллельными плоскостями с поверхностной плотностью зарядов $+5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2$ и $-9 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2$ заполнено стеклом. Определить напряженность поля: а) между плоскостями, б) вне плоскостей.

3. На расстоянии 8 см друг от друга в воздухе находятся два заряда по 1 нКл . Определить напряженность и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии 5 см от зарядов.

4. Заряды по 1 нКл помещены в вершинах равностороннего треугольника со стороной $0,2 \text{ м}$. Равнодействующая сил, действующих на четвертый заряд, помещенный на середине одной из сторон треугольника, равна $0,6 \text{ мкН}$. Определить этот заряд, напряженность и потенциал поля в точке его расположения.

5. Два одинаковых заряда находятся в воздухе на расстоянии $0,1 \text{ м}$ друг от друга. Напряженность поля в точке, удаленной на расстоянии $0,06 \text{ м}$ от одного и $0,08 \text{ м}$ от другого заряда, равна 10 кВ/м . Определить потенциал поля в этой точке и значение зарядов.

6. В поле бесконечной равномерно заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда 10 мкКл/м^2 перемещается заряд из точки, находящийся на расстоянии $0,1 \text{ м}$ от плоскости, в точку на расстоянии $0,5 \text{ м}$ от неё. Определить заряд, если при этом совершается работа 1 мДж .

7. Какую работу надо совершить, чтобы заряды в 1 и 2 нКл, находящиеся в воздухе на расстоянии $0,5$ м, сблизить до $0,1$ м?

8. Заряд -1 нКл притянулся к бесконечной плоскости, равномерно заряженной с поверхностной плотностью $0,2$ мкКл/м². На каком расстоянии от плоскости находился заряд, если работа сил поля по его перемещению равна 1 мкДж?

9. Со скоростью $2 \cdot 10^7$ м/с электрон влетает в пространство между обкладками плоского конденсатора в середине зазора в направлении, параллельном обкладкам. При какой минимальной разности потенциалов на обкладках электрон не вылетит из конденсатора, если длина обкладок конденсатора 10 см, а расстояние между его обкладками 1 см?

10. Заряд -1 нКл переместился в поле заряда $+1,5$ нКл из точки с потенциалом 100 В в точку с потенциалом 600 В. Определить работу сил поля и расстояние между этими точками.

11. Конденсатор с парафиновым диэлектриком заряжен до разности потенциалов 150 В. Напряженность поля в нем $6 \cdot 10^6$ В/м. Площадь пластин 6 см². Определить емкость конденсатора и поверхностную плотность заряда на обкладках ($\epsilon_{\text{парафина}} = 2,0$).

12. Вычислить емкость батареи, состоящей из трех конденсаторов емкостью 1 мкФ каждый, при всех возможных случаях их соединения.

13. Заряд на каждом из двух последовательно соединенных конденсаторов емкостью 18 и 10 нкФ равен $0,09$ нКл. Определить напряжение: а) на батарее конденсаторов, б) на каждом конденсаторе.

14. Конденсатор емкостью 16 мкФ последовательно соединен с конденсатором неизвестной емкости и они подключены к источнику постоянного напряжения 12 В. Определить емкость второго конденсатора и напряжение на каждом конденсаторе, если заряд батареи 24 мкКл.

15. Два конденсатора одинаковой емкости по 3 мкФ заряжены один до напряжения 100 В, а другой до 200 В. Определить напряжение между обкладками конденсатора, если их соединить параллельно: а) одноименно, б) разноименно заряженными обкладками.

16. Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов 300 В. Площадь пластин 10 см², напряженность поля в зазоре между ними 300 кВ/м. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах, емкость и энергию конденсатора.

17. Найти объемную плотность энергии электрического поля, создаваемого заряженной металлической сферой радиусом 5 см на расстоянии 5 см от ее поверхности, если поверхностная плотность заряда на ней 2 мкКл/м^2 .

18. Площадь пластин плоского слюдяного конденсатора $1,1\text{ см}^2$, зазор между ними 3 мм . При разряде конденсатора выделилась энергия 1 мкДж . До какой разности потенциалов был заряжен конденсатор? ($\epsilon_{\text{слюды}} = 6$).

19. Энергия плоского воздушного конденсатора $0,4\text{ нДж}$, разность потенциалов на обкладках 600 В , площадь пластин 1 см^2 . Определить расстояние между обкладками, напряженность и объемную плотность энергии поля конденсатора.

20. Под действием силы притяжения 1 мН диэлектрик между обкладками конденсатора находится под давлением 1 Па . Определить энергию, объемную плотность энергии поля конденсатора, если расстояние между его обкладками 1 мм .

21. Плотность тока в никелиновом проводнике длиной 25 м равна 1 МА/м^2 . Определить разность потенциалов на концах проводника ($\rho_{\text{никелина}} = 40,0 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$).

22. Определить плотность тока в нихромовом проводнике длиной 5 м , если на концах его поддерживается разность потенциалов 2 В ($\rho_{\text{нихрома}} = 110,0 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$).

23. Напряжение на концах проводника сопротивлением 5 Ом за $0,5\text{ с}$ равномерно возрастает от 0 до 20 В . Какой заряд проходит через проводник за это время?

24. Температура вольфрамовой нити лампы $2000\text{ }^\circ\text{С}$, диаметр $0,02\text{ мм}$, сила тока в ней 4 А . Определить напряженность поля в нити ($\rho_{\text{вольфрама}} = 5,5 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\alpha = 5,2 \cdot 10^{-3}\text{ К}^{-1}$).

25. На концах никелинового проводника длиной 5 м поддерживается разность потенциалов 12 В . Определить плотность тока в проводнике, если его температура $540\text{ }^\circ\text{С}$ ($\rho_{\text{никелина}} = 40,0 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\alpha = 10^{-4}\text{ К}^{-1}$).

26. Внутреннее сопротивление аккумулятора 1 Ом . При силе тока 2 А его КПД = $0,8$. Определить ЭДС аккумулятора.

27. Определить ЭДС аккумуляторной батареи, ток короткого замыкания которой 10 А , если при подключении к ней резистора сопротивлением 9 Ом сила тока в цепи равна 1 А .

28. ЭДС аккумулятора автомобиля 12 В . При силе тока 3 А его КПД = $0,8$. Определить внутреннее сопротивление аккумулятора.

29. К источнику тока подключают один раз резистор сопротивлением 1 Ом , другой раз – 4 Ом . В обоих случаях на подключаемых резисторах за одно и то же время выделяется равное количество теплоты. Определить внутреннее сопротивление источника тока.

30. Два одинаковых источника тока соединены в одном случае последовательно, в другом – параллельно и замкнуты на внешнее сопротивление 1 Ом . При каком внутреннем сопротивлении источника сила тока во внешней цепи будет в обоих случаях одинаковой?

Качественные задачи

31. Посередине между двумя равными по модулю и противоположными по знаку зарядами находится незаряженный проводящий шарик. Если его сместить в сторону одного из зарядов, то останется он на том месте, куда его сместили, или будет двигаться в каком-то направлении?

32. Между вертикально расположенными обкладками плоского конденсатора висит на длинной нити заряженный металлический шарик, причем к одной обкладке он расположен ближе, чем к другой. Как будет вести себя шарик?

33. Два проводящих шарика несут одинаковые заряды. Расстояние между ними нельзя считать большим по сравнению с их диаметром. В каком случае сила взаимодействия между шариками больше – когда они заряжены одноименно или разноименно?

34. Два равных одноименных заряда находятся на некотором расстоянии друг от друга. По каким законам изменяются напряженность и потенциал электрического поля вдоль оси, проходящей через середину расстояния между зарядами в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей заряды?

35. В какой из точек заряженного конденсатора с непараллельными обкладками поверхностная плотность заряда больше?

36. Когда обкладки плоского конденсатора присоединили к источнику ЭДС, они стали притягиваться с силой F . Увеличится или уменьшится сила притяжения, если между обкладками ввести пластину диэлектрика с проницаемостью $\varepsilon=7$?

37. Воздушный конденсатор заряжают до разности потенциалов $\Delta\varphi$ и заливают маслом. При этом энергия конденсатора уменьшается в ε раз. Почему энергия электрического поля уменьшается?

38. Чем объяснить, что изоляторы линий высокого напряжения вместо белого цвета окрашены в черный цвет?

39. Как изменится емкость конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить диэлектриком?

40. Чем объяснить, что в цепи постоянного тока при упорядоченном перемещении зарядов не происходит выравнивание потенциалов в различных ее точках?

41. Можно ли завести автомобиль, используя вместо аккумулятора батарею сухих элементов с той же ЭДС?

42. Можно ли измерить напряжение в осветительной цепи с помощью вольтметра со шкалами до 100 и 150 В?

43. Три резистора соединены последовательно. Как, не разъединяя цепи, соединить их параллельно?

44. Две лампы разной мощности включены в цепь последовательно. Какая из ламп будет гореть ярче?

45. Участок цепи состоит из трех параллельно соединенных разных сопротивлений. На каком из них выделится больше тепла при прохождении тока?

46. Может ли работать радиолампа с разбитым корпусом в космосе?

47. Почему электрические лампы перегорают в момент включения тока, и редко – в момент выключения?

48. Почему в зимнее время не наблюдается молний?

49. Почему птицы слетают с провода высокого напряжения, когда включают ток?

50. Трамвайная линия питается постоянным током, причем воздушный провод присоединен к положительному полюсу динамомашины, а рельсы – к отрицательному. Почему не наоборот?

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический заряд?
2. Перечислите свойства заряда?
3. Как взаимодействуют заряды?
4. Что такое электрическое поле?
5. Чем определяется напряженность электрического поля?
6. Как проводят линии напряженности электрического поля?
7. Что такое поток вектора напряженности?
8. Запишите теорему Гаусса.

9. Является ли электростатическое поле потенциальным?
10. Дайте определение циркуляции вектора напряженности?
11. Что такое потенциал электрического поля?
12. Что такое эквипотенциальные поверхности?
13. Назовите условия существования электрического тока.
14. Запишите условие непрерывности.
15. Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
16. Дайте определение сторонних сил и ЭДС.
17. Запишите закон Ома для неоднородного участка цепи.
18. Запишите формулу закона Ома для полной цепи.
19. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
20. Сформулируйте правила Кирхгофа.

Раздел IV. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Перед решением задач по электромагнетизму следует научиться определять направление магнитного поля токов различной конфигурации, тока индукции, направление силы, действующей на проводник с током, помещенного в магнитное поле, направление силы, действующей на движущейся в магнитном поле заряд.

Основные законы и формулы

Закон Ампера

$$dF = B I \sin \alpha dl$$

Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля

$$B = \mu \mu_0 H$$

Закон Био-Савара-Лапласа

$$dB = \mu \mu_0 I \sin \alpha dl / (4 \pi r^2)$$

Магнитная индукция:

поля, созданного бесконечно длинным прямым проводником с током

$$B = \mu \mu_0 I / (2 \pi r)$$

поля, созданного отрезком проводника

$$B = (\mu \mu_0 I / 4 \pi r) \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

поля бесконечно длинного соленоида

$$B = \mu \mu_0 n I$$

в центре кругового тока

$$B = \mu \mu_0 I / (2R)$$

Сила взаимодействия двух прямолинейных бесконечно длинных параллельных проводников с током

$$F = \mu \mu_0 I_1 I_2 / (2 \pi d)$$

Сила Лоренца

$$\vec{F}_L = Q \cdot \vec{E} + Q[\vec{v} \times \vec{B}]; F_L = QvB \sin \alpha$$

Магнитный поток однородного магнитного поля

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Работа по перемещению контура с током в магнитном поле

$$A = I \cdot \Delta \Phi$$

Основной закон электромагнитной индукции

$$E_i = -Nd\Phi/dt = -d\Psi/dt$$

Потокоцепление

$$\Psi = N\Phi$$

Потокоцепление соленоида

$$\Psi = LI$$

Электродвижущая сила самоиндукции

$$E_s = -L dI/dt$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu \mu_0 n^2 l S$$

Энергия магнитного поля

$$W = LI^2/2$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$W = BH/2 = B^2/(2\mu\mu_0) = \mu\mu_0 H^2/2$$

Примеры решения задач

Пример 1. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 89 кВ, влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции. Индукция поля равна 0,01 Тл. Определить радиус траектории электрона.

Дано: $U=88$ кВ, $B=0,01$ Тл, $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Найти: R.

Решение: Сила Лоренца $F_{\text{Л}} = evB \sin \alpha$ служит центростремительной силой $F_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R}$, движущей электрон по окружности. Энергия электрона $mv^2/2 = eu$.

Откуда: $v = \sqrt{2eu/m}$. Из равенства сил $F_{\text{Л}} = F_{\text{ц}}$.

$$R = \frac{1}{B} \frac{\sqrt{2um}}{\sqrt{e}} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}} \frac{\sqrt{2 \cdot 88 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Кг}}}{\sqrt{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}} = 0,1 \text{ м}$$

Ответ: $R = 0,1 \text{ м}$

Пример 2. Соленоид длиной 20 см и диаметром 4 см имеет плотную трехслойную обмотку из провода диаметром $0,1 \text{ мм}$. По обмотке соленоида течет ток $0,1 \text{ А}$. Определить напряженность и индукцию поля в соленоиде, индуктивность соленоида, энергию и объемную плотность энергии поля соленоида.

Дано: $l = 0,2 \text{ м}$, $D = 0,04 \text{ м}$, $N = 3$, $d = 10^{-4} \text{ м}$, $I = 0,1 \text{ А}$.

Найти: H , B , L , W , w .

Решение: Напряженность поля внутри соленоида $H = I \cdot n$, где I – сила тока в обмотке; $n = N/d$ – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида; N – число слоев обмотки; d – диаметр провода.

Тогда $H = \frac{IN}{d} = \frac{0,1 \text{ А} \cdot 3}{10^{-4} \text{ м}} = 3000 \text{ А/м}$.

$$B = \mu \mu_0 H = 1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 3000 \text{ А/м} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

Индуктивность соленоида $L = \mu \mu_0 n^2 l S$, где l – длина соленоида; $S = \pi D^2/4$ – площадь поперечного сечения соленоида.

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2}{d^2} l \frac{\pi D^2}{4} = \frac{1 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 3^2 \cdot 0,2 \text{ м} \cdot 3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2} = 0,28 \text{ Гн}$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$w = \frac{BH}{2} = \frac{3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Тл} \cdot 3000 \text{ А/м}}{2} = 5,7 \text{ Дж/м}^3$$

Энергия магнитного поля соленоида вычисляется по формуле:

$$W = wSl \text{ или } W = \frac{LI^2}{2} = 0,28 \text{ Гн} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ А}^2 \cdot \frac{1}{2} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$$

Ответ: $H = 3000 \text{ А/м}$, $B = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$, $L = 0,28 \text{ Гн}$, $w = 5,7 \text{ Дж/м}^3$, $W = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Два бесконечно длинных прямолинейных проводника с токами 6 и $8A$ расположены перпендикулярно друг к другу. Определить индукцию и напряженность магнитного поля на середине кратчайшего расстояния между проводниками, равного 2 см.

2. По двум бесконечно длинным прямолинейным параллельным проводникам, расстояние между которыми 15 см, в одном направлении текут токи 4 и $6A$. Определить расстояние от проводника с меньшим током до геометрического места точек, в котором напряженность магнитного поля равна 0 .

3. Решить задачу 2 для случая, когда токи текут в противоположном направлении.

4. По кольцевому проводнику радиусом 10 см течет ток 4 А. Параллельно плоскости кольцевого проводника на расстоянии 2 см над его центром проходит бесконечно длинный прямолинейный проводник, по которому течет ток 2 А. Определить индукцию и напряженность магнитного поля в центре кольца. Рассмотреть все возможные случаи.

5. Два круговых витка с током лежат в одной плоскости и имеют общий центр. Радиус большого витка 12 см, меньшего 2 см. Напряженность поля в центре витков равна 50 А/м, если токи текут в одном направлении, и равна 0 , если в противоположных. Определить силу тока в витках.

6. По квадратной рамке со стороной $0,2$ м течет ток 4 А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре рамки.

7. Два параллельных бесконечно длинных проводника с токами 10 А взаимодействуют с силой 1 мН на 1 м их длины. На каком расстоянии находятся проводники?

8. Найти радиус траектории протона в магнитном поле с индукцией $0,5$ Тл, если он движется перпендикулярно вектору магнитной индукции и обладает кинетической энергией 3 МэВ.

9. Электрон с энергией 300 эВ движется перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля напряженностью 465 А/м. Определить силу Лоренца, скорость и радиус траектории электрона.

10. Момент импульса протона в однородном магнитном поле напряженностью 20 кА/м равен $6,6 \cdot 10^{-23}$ кг·м²/с. Найти кинетиче-

скую энергию протона, если он движется перпендикулярно линиям магнитной индукции поля.

11. На расстоянии 5 мм параллельно прямолинейному длинному проводнику движется электрон с кинетической энергией 1 кэВ . Какая сила будет действовать на электрон, если по проводнику пустить ток 1 А ?

12. Протон движется в магнитном поле напряженностью 10^5 А/м по окружности радиусом 2 см . Найти кинетическую энергию протона.

13. Однородное магнитное поле напряженностью 900 А/м действует на помещенный в него проводник длиной 25 см и силой 1 мН . Определить силу тока в проводнике, если угол между направлениями тока и индукции магнитного поля разен 45° .

14. Перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией $0,3 \text{ Тл}$ движется проводник длиной 15 см со скоростью 10 м/с . Направления скорости и нормали к проводнику совпадают. Определить ЭДС, индуцируемую в проводнике.

15. На концах крыльев самолета с размахом 20 м , летящего со скоростью 900 км/ч , возникает ЭДС индукции $0,06 \text{ В}$. Определить вертикальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

16. В плоскости, перпендикулярной однородному магнитному полю напряженностью $2 \cdot 10^5 \text{ А/м}$, вращается стержень длиной $0,4 \text{ м}$ относительно оси, проходящей через его середину. В стержне индуцируется ЭДС, равная $0,2 \text{ В}$. Определить угловую скорость стержня.

17. Соленоид без сердечника длиной 15 см и диаметром 4 см имеет 100 витков на 1 см длины, включен в цепь источника тока. За 1 мс сила тока в нем изменилась на 10 мА . Определить ЭДС самоиндукции, считая, что ток в цепи изменяется равномерно.

18. Решить задачу 17 для случая соленоида с сердечником, магнитная проницаемость которого равна 1000 .

19. Сила тока в соленоиде равномерно возрастает от 0 до 10 А за одну минуту. При этом соленоид накапливает энергию 20 Дж . Какая ЭДС индуцируется в соленоиде?

20. Однослойный соленоид без сердечника длиной 20 см и диаметром 4 см имеет плотную намотку медным проводом диаметром $0,1 \text{ мм}$. За $0,1 \text{ с}$ сила тока в нем равномерно убывает с 5 до 0 А . Определить ЭДС индукции в соленоиде.

21. Чему равна объемная плотность энергии магнитного поля в соленоиде без сердечника, имеющего плотную однослойную намотку проводом диаметром $0,2$ мм, если по нему течет ток $0,1$ А?

22. По условию задачи 21 найти энергию магнитного поля соленоида, если его длина 20 см, а диаметр 5 см.

23. По соленоиду длиной $0,25$ м, имеющему число витков 500 , течет ток 1 А. Площадь поперечного сечения 15 см². Найти энергию магнитного поля соленоида.

24. Квадратная рамка со стороной 4 см, содержащая 100 витков, помещена в однородное магнитное поле напряженностью 100 А/м. Направление поля составляет угол 30° с нормалью к рамке. Какая работа совершается при повороте рамки на 30° в одну и другую стороны, если по ней течет ток 1 А?

25. По условию задачи 24 определить работу при повороте рамки в положение, при котором ее плоскость совпадает с направлением линий индукции поля.

26. Под действием однородного магнитного поля перпендикулярно линиям индукции начинает перемещаться прямолинейный проводник с силой тока 10 А и массой 2 кг. Какой магнитный поток пересечет этот проводник к моменту времени, когда скорость его будет равна $31,6$ м/с?

27. Проводник с током 1 А длиной $0,3$ м равномерно вращается вокруг оси, проходящей через его конец, в плоскости, перпендикулярной линиям индукции магнитного поля напряженностью 1 кА/м. За 1 мин вращения совершается работа $0,1$ Дж. Определить угловую скорость вращения проводника.

28. Однородное магнитное поле, объемная плотность энергии которого $0,4$ Дж/м³, действует на проводник, расположенный перпендикулярно линиям индукции, силой $0,1$ мН на 1 см его длины. Определить силу тока в проводнике.

29. По обмотке соленоида с параметрами: число витков – 1000 , длина – $0,5$ м, диаметр – 4 см течет ток $0,5$ А. Определить потокосцепление, энергию и объемную плотность энергии соленоида.

30. Обмотка соленоида имеет сопротивление 10 Ом. Какова его индуктивность, если при прохождении тока за $0,05$ с в нем выделяется количество теплоты, эквивалентное энергии магнитного поля соленоида?

Качественные задачи

31. Как узнать, какой из двух стальных стержней намагничен, не используя никаких других магнитных тел и приборов?

32. Можно ли намагнитить железное кольцо или шар?

33. В двух цилиндрических магнитах просверлено по одному отверстию: в одном – вдоль оси, в другом – перпендикулярно оси. Нарисуйте картину силовых линий магнитного поля в том и другом случаях.

34. Контур с током помещен в магнитное поле. В каком случае его положение устойчиво, а в каком – неустойчиво и почему?

35. В коротко замкнутую катушку один раз быстро, другой – медленно вдвигают магнит. Одинаковый ли заряд пройдет через поперечное сечение провода катушки?

36. Внутри медного кольца, подвешенного в вертикальной плоскости, вдвигают стальной стержень. Отклонится ли кольцо от своего вертикального положения?

37. Контуры круглой, трапециевидной и прямоугольной форм перемещаются в однородном магнитном поле. Одинаковая ли ЭДС индукции возникает в них?

38. Сквозь отверстие в катушке падает прямой магнит. Будет ли ускорение магнита одинаковым, если катушка замкнута или разомкнута?

39. Почему колебания стрелки магнитоэлектрического прибора быстро затухают, если его клеммы замкнуть?

40. По какому закону должен изменяться магнитный поток в зависимости от времени, чтобы ЭДС индукции, возникающая в контуре, оставалась постоянной?

41. Частоту вращения проволочной рамки в однородном магнитном поле увеличили в 2 раза. Во сколько раз изменится частота переменного тока в рамке и ЭДС индукции?

42. Проволочная рамка вращается с постоянной угловой скоростью в однородном магнитном поле. Схематично нарисуйте график зависимости силы тока в рамке от времени.

43. Для чего используется повышающий трансформатор на электростанциях?

44. При колебаниях металлического маятника между полюсами электромагнита маятник сильно тормозится. Почему?

45. Как изменится период колебаний в колебательном контуре, если пластины конденсатора, включенного в контур, сблизить между собой?

46. Могут ли в контуре, состоящем из конденсатора и активного сопротивления, возникать свободные колебания?

47. Изменится ли сопротивление проводника постоянному току, если проводник намотать на железный стержень?

48. Изменится ли сопротивление проводника переменному току, если проводник намотать на железный стержень?

49. Как надо перемещать в магнитном поле Земли замкнутый проволочный прямоугольник, чтобы в нем наводился ток?

50. Какие из частиц катодных лучей отклоняются на больший угол одним и тем же магнитным полем: более быстрые или медленные?

Контрольные вопросы

1. Назовите источники магнитного поля.
2. Какие вы знаете основные характеристики магнитного поля?
3. В чем заключается закон Ампера?
4. Как графически изображают магнитное поле?
5. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа?
6. Чему равен магнитный момент витка с током?
7. Как взаимодействуют параллельные токи?
8. Что такое магнитный поток?
9. Сформулируйте теорему Гаусса для магнитного поля?
10. В чем заключается закон полного тока?
11. Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле?
12. Как действует магнитное поле на движущиеся заряды?
13. В чем заключается эффект Холла?
14. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
15. Сформулируйте правило Ленца.
16. Что такое индуктивность?
17. В чем заключается явление самоиндукции?
18. В чем заключается явление взаимной индукции?
19. От чего зависит коэффициент индуктивности?
20. Где применяется явление электромагнитной индукции?

Раздел V. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Задачи этого раздела затрагивают в основном волновую природу света. В начале решения этих задач полезно сделать рисунок хода лучей, выделив падающие и отраженные лучи. Желательно будет также вспомнить некоторые тригонометрические соотношения.

Основные законы и формулы

Оптическая разность хода

$$\Delta = S_2 n_2 - S_1 n_1$$

Уравнение интерференционного максимума

$$\Delta = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Уравнение интерференционного минимума

$$\Delta = \pm (2m-1) \frac{\lambda}{2} \quad (m=1, 2, \dots)$$

Ширина интерференционных полос в опыте Юнга

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}$$

Оптическая разность хода в тонких пленках:

в проходящем свете

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i}$$

отраженном свете

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

Радиусы светлых колец Ньютона в проходящем свете (или темных – в отраженном)

$$r_m = \sqrt{mR\lambda} \quad (m = 1, 2, \dots)$$

Радиусы темных колец Ньютона в проходящем свете (или светлых – в отраженном)

$$r_m = \sqrt{(2m-1)R \frac{\lambda}{2}} \quad (m = 1, 2, \dots)$$

Радиусы зон Френеля: для сферического волнового фронта,

$$r_m = \sqrt{\frac{m\lambda ab}{a+b}}$$

для плоского волнового фронта

$$r_m = \sqrt{m\lambda b} \quad (m=1, 2, \dots)$$

Направление дифракционных максимумов от одной щели

$$a \sin \varphi_m = \pm (2m+1) \frac{\lambda}{2}$$

и минимумов от одной щели

$$a \sin \varphi_m = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, \dots)$$

Условие главных максимумов дифракционной решетки

$$d \sin \varphi_m = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = mN$$

Формула Вульфа-Брэггов

$$2d \sin \theta_m = m \lambda$$
$$(m = 1, 2, \dots)$$

Степень поляризации

$$P = (J_{max} - J_{min}) / (J_{max} + J_{min})$$

Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_0 = \frac{n_2}{n_1}$$

Закон Малюса

$$J = J_0 \cos^2 \alpha$$

Угол поворота плоскости поляризации
света в кристаллах

$$\varphi = \alpha l$$

и в растворах

$$\varphi = [\alpha] c l$$

Фазовая скорость света

$$v = c/n$$

Примеры решения задач

Пример 1. В просветленной оптике для устранения отражения света от поверхности линзы на нее наносится тонкая пленка вещества с показателем преломления 1,26, меньшим, чем у стекла. В какой наименьшей толщине пленки отражение света с длиной волны 0,55 мкм не будет наблюдаться, если угол падения лучей 45°?

Дано: $n = 1,26$; $\lambda = 0,55$ мкм; $i = 45^\circ$.

Найти: d_{min} .

Решение: Оптическая разность хода лучей, отраженных от нижней и верхней поверхностей пленки $\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}$, (1)
где d – толщина пленки; n – показатель преломления пленки; i – угол падения лучей. В выражении (1) учтено, что при отражении от среды с большим показателем преломления происходит потеря полуволны. Это наблюдается как на верхней, так и на нижней поверхности пленки.

Условие интерференционного минимума:

$$\Delta = (2m-1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m=1,2\dots), \quad (2)$$

где λ – длина волны света. Подставляем (1) в (2) и учитывая, что выражение (1) положительно, получаем:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = (2m-1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{откуда} \quad d = \frac{(2m-1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

Наименьшая толщина пленки будет при $m = 1$

$$d_{min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} = \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{4\sqrt{1,26^2 - \sin^2 45^\circ}} = 0,13 \text{ мкм}.$$

Ответ: $d_{min} = 0,13$ мкм.

Пример 2. На дифракционную решетку падает нормально монохромный свет с длиной волны $0,6 \text{ мкм}$. На экране, расположенном на расстоянии $0,55 \text{ м}$, наблюдается дифракционная картина, на которой расстояние между дифракционными максимумами первого порядка равно 12 см . Определить постоянную дифракционной решетки и общее число главных максимумов, получаемых с помощью данной решетки.
 Дано: $\lambda = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $L = 0,55 \text{ м}$; $l = 0,12 \text{ м}$; $m = \pm 1$.

Найти: d , N .

Решение: Запишем условие главных максимумов дифракционной решетки: $d \sin \varphi_m = \pm m \lambda$, (1)

где d – постоянная решетки; φ_m – угол между нормалью к решетке и направлением на m дифракционный максимум; m – порядок главного дифракционного максимума; λ – длина волны, падающего на решетку света. По условию задачи $m = \pm 1$. Учитывая, что L можно записать:

$$\sin \varphi_m \approx \operatorname{tg} \varphi_m = \frac{l}{2L}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим $\frac{dl}{2L} = \lambda$, или $d = \frac{2\lambda L}{l}$. (3)

Подставляя в (3) числовые значения величин, находим:

$$d = \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 0,55 \text{ м}}{0,12 \text{ м}} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,55 \text{ мкм}.$$

Для определения общего числа главных максимумов, даваемых дифракционной решеткой, учтем, что максимальный угол отклонения лучей от нормали к решетке не может превышать 90° , т.е. в формуле (1) $\sin \varphi_m = 1$. С учетом этого условия из (1) получим, что

$$m_{\max} = \pm d / \lambda, \text{ или } m_{\max} = \pm 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} / 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} = \pm 9.$$

Тогда общее число максимумов $N = 2m_{\max} + 1$, т.е. влево и вправо от центрального (нулевого) максимума будет наблюдаться по m_{\max} максимумов

$$N = 2 \cdot 10 + 1 = 21.$$

Ответ: $d = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $N = 21$.

Пример 3. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор, уменьшилась в 2,2 раза. Определить, во сколько раз она уменьшится, если поставить второй такой же поляризатор на пути луча, вышедшего из первого. Угол между главными плоскостями поляризаторов равен 45° .

Дано: $J_0/J_1 = 2,2$; $\alpha = 45^0$.

Найти: J_0/J_2 .

Решение: Естественный свет, проходя через поляризатор, на выходе из него становится плоскополяризованным. Интенсивность такого луча с учетом потерь на отражение и поглощение поляризатором равна:

$$J_1 = \frac{1}{2} J_0(1 - K), \quad (1)$$

где J_0 – интенсивность естественного (белого) света; K – коэффициент поглощения.

После прохождения света через второй поляризатор, интенсивность уменьшается как по закону Малюса, так и за счет отражения и поглощения, т.е. $J_2 = J_1(1 - K)\cos^2 \alpha$,

где α – угол между плоскостями поляризации света первого и второго поляризатора. Подставляя (1) в (2), находим:

$$\frac{J_0}{J_2} = \frac{2}{(1 - K)^2 \cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

Из (1) имеем $1 - K = \frac{2J_1}{J_0}$. (4)

Подставляя (4) в (3), получим:

$$\frac{J_0}{J_2} = \frac{1}{2 \cos^2 \alpha} \left(\frac{J_0}{J_1} \right)^2 = \frac{1}{2 \cos^2 45^0} \cdot 2,2^2 = 4,84.$$

Ответ: $\frac{J_0}{J_2} = 4,84$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Расстояние между двумя когерентными источниками (опыт Юнга) $0,55$ мм. Источники испускают свет длиной волны 550 нм. Каково расстояние от щелей до экрана, если расстояние между соседними темными полосами на нем равно 1 мм?

2. Найти длину волны света, освещающего установку в опыте Юнга, если при помещении на пути одного из интерферирующих лучей стеклянной пластинки ($n = 1,52$) толщиной 3 мкм картина интерференции на экране смещается на три светлые полосы.

3. Найти расстояние между третьим и пятым минимумами на экране, если расстояние от двух когерентных источников ($\lambda = 0,6$ мкм) до экрана равно $1,5$ м. Расстояние между источниками $0,2$ мм.

4. Два когерентных источника, расстояние между которыми $0,2$ мм, расположены от экрана на $1,5$ м. Найти длину световой вол-

ны, если третий минимум интерференции расположен на экране на расстоянии $12,6$ мм от центра картины.

5. Найти наименьший угол падения монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм) на мыльную пленку ($n=1,3$) толщиной $0,1$ мкм, находящуюся в воздухе, при котором пленка в проходящем свете кажется темной.

6. На пленку из глицерина толщиной $0,1$ мкм падает белый свет. Каким будет казаться цвет пленки в отраженном свете, если угол падения лучей 45° ($n=1,47$)?

7. Радиус кривизны плосковыпуклой линзы $12,1$ м. Диаметр второго светлого кольца Ньютона в отраженном свете равен $6,6$ мм. Найти длину волны падающего света, если он падает нормально.

8. Какую наименьшую толщину должна иметь мыльная пленка, чтобы отраженные лучи имели красную окраску ($\lambda = 0,63$ мкм)? Белый луч падает на пленку под углом 30° ($n=1,33$).

9. Для получения колец Ньютона используют плосковыпуклую линзу. Освещая ее монохроматическим светом с длиной волны $0,6$ мкм, установили, что расстояние между пятым и шестым кольцами в отраженном свете равно $0,56$ мм. Определить радиус кривизны линзы.

10. Определить радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете, если между линзой с радиусом кривизны 5 м и плоской поверхностью, к которой она прижата, находится вода. Свет с длиной волны $0,589$ мкм падает нормально ($n=1,3$).

11. Экран, на котором наблюдается дифракционная картина, расположен на расстоянии 1 м от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм). По середине между экраном и источником помещена диафрагма с круглым отверстием. При каком наименьшем диаметре отверстия центр дифракционной картины будет темным?

12. Свет от монохроматического источника ($\lambda = 0,6$ мкм) падает нормально на диафрагму с круглым отверстием с радиусом $0,6$ мм. Темным или светлым будет центр дифракционной картины на экране, находящемся на расстоянии $0,3$ м от диафрагмы?

13. На узкую щель шириной $0,1$ мм падает нормально плоская монохроматическая волна $\lambda = 0,585$ мкм. Найти расстояние между первыми дифракционными минимумами на экране, удаленном от щели на $0,6$ м.

14. Дифракционная решетка шириной 12 мм содержит 4800 штрихов. Определить число главных максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки, для длины волны $0,55 \text{ мкм}$.

15. На дифракционную решетку с периодом $4,8 \text{ мкм}$ падает нормально естественный свет. Какие спектральные линии, соответствующие длинам волн в видимой области спектра, будут совпадать в направлении $\varphi = 30^\circ$?

16. Период дифракционной решетки $0,005 \text{ мм}$. Определить число наблюдаемых главных максимумов в спектре дифракционной решетки для длины волны монохроматического света $0,445 \text{ мкм}$.

17. Постоянная дифракционной решетки равна $2,5 \text{ мкм}$. Определить наибольший порядок спектра, общее число главных максимумов в дифракционной картине и угол дифракции в спектре второго порядка при нормальном падении монохроматического света с длиной волны $0,62 \text{ мкм}$.

18. На грань кристалла каменной соли падает пучок рентгеновских лучей длиной $0,147 \text{ нм}$. Какое расстояние между атомными плоскостями в кристалле, если дифракционный максимум первого порядка наблюдается при падении лучей под углом $15^\circ 12'$ к поверхности кристалла?

19. Расстояние между атомными плоскостями кристалла кальция равно $0,3 \text{ нм}$. Определить, при какой длине волны рентгеновского излучения второй дифракционный максимум будет наблюдаться при отражении лучей под углом 30° к поверхности кристалла.

20. Какую разность длин волн может разрешить дифракционная решетка с периодом $2,5 \text{ мкм}$ шириной $1,5 \text{ см}$ в спектре третьего порядка для зеленых лучей ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$)?

21. Естественный свет падает на кристалл алмаза под углом полной поляризации. Найти угол преломления света ($n=2,42$).

22. Раствор сахара с концентрацией $0,25 \text{ г/см}^3$ и толщиной 20 см поворачивает плоскость поляризации монохроматического света на угол $30^\circ 20'$. Другой раствор толщиной 15 см поворачивает плоскость поляризации этого же света на угол 20° . Определить концентрацию сахара во втором растворе.

23. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляроид, уменьшилась в $4,5$ раза. Во сколько раз она уменьшится, если второй такой же поляроид поставить за первым так, чтобы угол между плоскостями поляризации их был 60° ? Коэффициент поглощения в обоих поляроидах одинаковый.

24. Найти угол между плоскостями поляризации двух поляроидов, если интенсивность света, прошедшего оба поляроида, уменьшилась в 6,5 раз. Коэффициент поглощения света в обоих поляроидах 0,3.

25. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы свет, отраженный от поверхности воды, был максимально поляризован ($n = 1,33$)?

26. Угол между плоскостями поляризации двух поляроидов 30° . Как изменится интенсивность прошедшего через них света, если этот угол увеличить вдвое?

27. Главные плоскости двух призм Николя образуют между собой угол 60° . Насколько следует изменить угол между главными плоскостями, чтобы интенсивность прошедшего света увеличилась вдвое?

28. Угол между плоскостями поляризации двух поляроидов 70° . Как изменится интенсивность прошедшего через них света, если этот угол уменьшить в пять раз?

29. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации, коэффициент отражения света равен 0,095. Найти степень поляризации преломленного луча.

30. Естественный свет падает на поверхность диэлектрика под углом полной поляризации. Коэффициент пропускания света равен 0,915. Найти степень поляризации преломленного луча.

Качественные задачи

31. Почему Луна должна иметь шероховатую, а не зеркальную поверхность?

32. Чему равно фокусное расстояние плоского зеркала?

33. Пучок параллельных лучей света, входя в воду под углом, расширяется. Почему?

34. Почему в жаркую погоду на шоссе на некотором расстоянии иногда возникает мираж в виде изображения перевернутых машин?

35. Чему равен угол преломления при нормальном падении света на границу раздела двух сред?

36. Нарисуйте ход лучей и объясните, почему стержень, частично погруженный в воду, кажется изломанным в том месте, где он входит в воду?

37. Докажите, что действительное изображение, полученное с помощью тонкой линзы, всегда перевернутое, если объект реальный?

38. На каком основании считается, что частота света не изменяется при переходе из одной среды в другую?

39. Почему, по мере удаления от центра, кольца Ньютона располагаются более тесно?

40. Насколько различаются фокусные расстояния рассеивающей и собирающей линз для фиолетового и желтого света?

41. Что будет наблюдаться на экране при дифракции на одной щели в параллельных лучах, если ширина щели равна длине волны света?

42. Как изменяется разрешающая способность дифракционной решетки при изменении угла наклона падающих на нее лучей?

43. С какого соотношения между радиусом отверстия R и расстоянием от экрана до точки наблюдения r_0 свет в точке наблюдения при увеличении r_0 не будет сменяться темнотой?

44. Какова интенсивность отраженного луча, если на изотропный диэлектрик падает под углом Брюстера луч плоско поляризованного света с электрическим вектором: а) перпендикулярным плоскости падения; б) лежащим в плоскости падения?

45. Как отличить естественный свет от света, поляризованного по кругу?

46. Какую поляризацию имеет свет, падающий на анализатор, если при любом положении анализатора поле зрения оказывается просветленным?

47. Какими способами можно получить из оптически изотропного вещества анизотропное?

48. Несимметричная тонкая линза дает изображение точечного предмета на своей оси. Как изменится изображение, если преломляющие поверхности линзы поменять местами?

49. Почему, по мере испарения мыльной пленки, расстояние между интерференционными полосами увеличивается?

50. При падении луча на плоскую границу раздела двух сред он частично отражается и преломляется. Как связан с оптическими свойствами среды угол падения луча, если отраженный луч перпендикулярен преломленному?

Контрольные вопросы

1. Что такое свет?
2. В чем заключается физический смысл принципа Гюйгенса?
3. Сформулируйте законы отражения и преломления света?
4. Как получить полное внутреннее отражение?
5. Какой физический смысл имеет относительный показатель преломления двух сред?
6. В чем суть явления “просветление оптики”?
7. Какие источники называют когерентными?
8. Что такое время и длина когерентности?
9. Сформулируйте условия максимума и минимума интерференции?
При каких условиях можно наблюдать интерференцию света?
10. Что такое дифракция света?
11. Какими параметрами характеризуется дифракционная решетка в качестве спектрального прибора?
12. Как определить, сколько максимумов дает дифракционная решетка?
13. Что называют поляризацией света?
14. Какие способы получения поляризованного света вы знаете?
15. Какие типы поляризации существуют?
16. Сформулируйте закон Брюстера.
17. Дайте определение закона Малюса.
18. Как получить двойное лучепреломление?
19. Назовите способы получения искусственной анизотропии?
20. Почему происходит вращение плоскости поляризации?

Раздел VI. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Задачи данного раздела позволяют глубже понять другую сторону (квантовую природу) света. В таких явлениях, как, например, при фотоэффекте и эффекте Комптона, свет ведет себя как поток частиц (квантов), энергия которых выражается формулой $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Перед решением задач на эффект Комптона необходимо сделать чертеж, на котором показать импульсы падающего и рассеянного фотона и импульс электрона отдачи.

Основные законы и формулы

Давление света при нормальном падении на поверхность

$$P = \frac{E_c}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho)$$

Энергия фотона

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Масса и импульс фотона

$$m_\phi = \frac{h\nu}{c^2}; \quad p = \frac{h\nu}{c}$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + E_k$$

Красная граница фотоэффекта

$$h\nu_{zp} = A; \quad \lambda_{zp} = \frac{hc}{A}$$

Изменение длины волны при эффекте Комптона

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Комптоновская длина волны

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = \frac{hc}{E_0}$$

Примеры решения задач

Пример 1. На зеркальную поверхность нормально падает монохромный свет с длиной волны $0,55 \text{ мкм}$, производя давление 9 мкПа . Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности и число фотонов, падающих на площадь 1 м^2 за 1 с .

Дано: $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$; $P = 9 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$.

Найти: n_0, N .

Решение: Давление света при нормальном падении на поверхность

определяется по формуле: $P = \frac{E_c}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho)$, (1)

где E_c – энергетическая освещенность поверхности, т.е. энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени; c – скорость света в вакууме, w – объемная плотность энергии излучения; ρ – коэффициент отражения поверхности, который в данном случае равен 1 .

Объемная плотность энергии равна произведению энергии одного фотона на число фотонов в единице объема

$$w = h\nu n_0 = \frac{hc}{\lambda} n_0, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка. Подставляя (2) в (1), получим

$$P = n_0 \frac{hc}{\lambda} (1 + \rho), \quad (3)$$

откуда
$$n_0 = \frac{P\lambda}{hc(1 + \rho)}. \quad (4)$$

Проводим вычисления

$$n_0 = \frac{9 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} (1 + 1)} = 1,25 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}.$$

Энергетическая освещенность поверхности E_c есть, по определению энергия всех фотонов, которые падают на единицу поверхности в единицу времени. Следовательно

$$E_c = N \frac{hc}{\lambda}, \quad \text{откуда } N = \frac{E_c \lambda}{hc}. \quad (5)$$

Выразив E_c из (1) и подставив в (5), получим
$$N = \frac{P\lambda}{h(1 + \rho)}. \quad (6)$$

Сравнивая (6) и (4), получаем $N = n_0 c$.

Подставляя числовые значения в полученную формулу, имеем

$$N = 1,25 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 3,75 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Ответ: $n_0 = 1,25 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$; $N = 3,75 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Пример 2. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовыми лучами с длиной волны $0,155 \text{ мкм}$; 2) γ – лучами с длиной волны 1 нм .

Дано: $\lambda_1 = 0,155 \text{ мкм} = 0,155 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $\lambda_2 = 1 \text{ нм} = 10^{-12} \text{ м}$.

Найти: v_{\max} .

Решение: Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта
$$\frac{hc}{\lambda} = A + E_k, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны; A – работа выхода электрона из металла; E_k – максимальная кинетическая энергия электрона, которая может быть выражена по классической формуле
$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

или по релятивистской формуле
$$E = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right), \quad (3)$$

в зависимости от того, какая скорость сообщается электрону.

Скорость же электрона зависит от энергии фотона
$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

вызывающего фотоэффект. Если энергия E фотона много меньше энергии покоя E_0 электрона, то может быть применена формула (2).

Если же E сравнима по величине с E_0 , то вычисление по формуле (2) приводит к ошибке, во избежание которой необходимо кинетическую энергию фотоэлектрона выражать по формуле (3).

1. Вычислим энергию фотона ультрафиолетовых лучей по формуле

$$(4): E_1 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{0,155 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 1,28 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 8 \text{ эВ}.$$

Полученная энергия фотона (8 эВ) много меньше энергии покоя электрона $E_0 = 0,511 \text{ МэВ}$. Следовательно, для данного случая кинетическая энергия фотоэлектрона в формуле (1) может быть выражена по классическому выражению (2) $E_1 = A + \frac{m_0 v_{\max}^2}{2}$.

$$\text{Откуда } v_{\max} = \sqrt{2 \frac{(E_1 - A)}{m_0}}. \quad (5)$$

Выпишем числовые значения величин h и m_0 из справочных данных и подставим их в формулу (5), предварительно выразив в единицах СИ: $A = 4,7 \text{ эВ} = 4,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 0,75 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$;

$$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; v_{\max} = \sqrt{\frac{2(1,28 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} - 0,75 \cdot 10^{-18} \text{ Дж})}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 1,08 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

2. Вычислим энергию фотона γ -лучей:

$$E_2 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{10^{-12} \text{ м}} = 1,99 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,24 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 1,24 \text{ МэВ}.$$

Работа выхода электрона ($A=4,7 \text{ эВ}$) так мала по сравнению с энергией фотона ($E_2=1,24 \text{ МэВ}$), что ею можно пренебречь и принять

$$E_{\kappa} = E_2 = 1,24 \text{ МэВ}.$$

Так как в данном случае кинетическая энергия электрона больше энергии покоя ($E_0 = 0,511 \text{ МэВ}$), то для вычисления скорости электрона следует взять релятивистскую формулу кинетической энергии

$$E_{\kappa} = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right), \text{ где } \beta = \frac{v}{c}.$$

Выполнив преобразования, найдем

$$\beta = \frac{\sqrt{(2E_0 + E_{\kappa})E_{\kappa}}}{E_0 + E_{\kappa}}, \text{ откуда } v_{\max} = \beta \cdot c = c \frac{\sqrt{(2E_0 + E_2)E_2}}{E_0 + E_2}.$$

Поскольку E_0 и E_2 входят в виде отношения, то их не обязательно выражать в единицах СИ.

Произведем вычисления :

$$v_{\max} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с} \frac{\sqrt{(2 \cdot 0,511 + 1,24) \cdot 1,24}}{0,511 + 1,24} = 2,85 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v_1 = 1,08 \cdot 10^6 \text{ м/с}$; $v_2 = 2,85 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Пример 3. Гамма-фотон с длиной волны $1,2 \cdot 10^{-12}$ м в результате эффекта Комптона отклонился от первоначального направления на угол 60° . Определить кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

Дано: $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-12}$ м; $\theta = 60^\circ$.

Найти: E_k , p .

Решение: Изменение длины волны при комптоновском рассеянии на свободном электроне равно

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2} = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta), \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 – длины волн падающего и рассеянного фотона; θ – угол рассеяния фотона; $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = \frac{hc}{E_0}$ – комптоновская длина волны,

$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м; m_0 и E_0 – соответственно масса и энергия покоя электрона; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме. Из выражения (1) найдем $\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_c(1 - \cos\theta)$. (2)

Выразим энергию падающего и рассеянного фотона через его длину волны $E_1 = \frac{hc}{\lambda_1}$; $E_2 = \frac{hc}{\lambda_2} = \frac{hc}{\lambda_1 + \lambda_c(1 - \cos\theta)}$. (3)

Кинетическая энергия электрона отдачи по закону сохранения энергии равна $E_k = E_1 - E_2$. (4)

Подставляя в последнюю формулу выражения E_1 и E_2 из (3), найдем:

$$E_k = \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_1 + \lambda_c(1 - \cos\theta)} = \frac{hc}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_c(1 - \cos\theta)}{\lambda_1 + \lambda_c(1 - \cos\theta)} = E_0 \frac{\lambda_c}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_c(1 - \cos\theta)}{\lambda_1 + \lambda_c(1 - \cos\theta)}.$$

Проводя вычисления, получим:

$$E_k = 0,511 \text{ МэВ} \frac{2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}}{1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}} \cdot \frac{2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}(1 - \cos 60^\circ)}{1,2 \cdot 10^{-12} \text{ м} + 2,43 \cdot 10^{-12} (1 - \cos 60^\circ)} = 0,492 \text{ МэВ} \\ = 0,787 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

Полученное значение кинетической энергии электрона сравнимо с энергией покоя $E_0 = 0,511$ МэВ. Поэтому выразим импульс электрона по релятивистской формуле:

$$P = \frac{1}{c} \sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}. \quad (5)$$

Проводя вычисления в (5), получим:

$$P = \frac{1}{3 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}} \sqrt{0,787 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}(0,787 \cdot 10^{-13} + 2 \cdot 0,818 \cdot 10^{-13}) \text{ Дж}} = \\ 4,6 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $E_k = 0,492$ МэВ; $P = 4,6 \cdot 10^{-22} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить давление солнечных лучей, нормально падающих на зеркальную поверхность. Интенсивность солнечного излучения принять равной $1,37 \text{ кВт/м}^2$.

2. Свет с длиной волны $0,5 \text{ мкм}$ нормально падает на зеркальную поверхность и производит на нее давления 4 мкПа . Определить число фотонов, ежесекундно падающих на 1 см^2 этой поверхности.

3. Давление света, нормально падающего на поверхность, равно 2 мкПа . Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности, если длина волны света равна $0,45 \text{ мкм}$, а коэффициент отражения $0,5$.

4. Пучок параллельных лучей монохроматического света с длиной волны $0,663 \text{ мкм}$ падает нормально на плоскую зеркальную поверхность. Определить силу давления, испытываемую этой поверхностью, если ее площадь равна 2 м^2 , а энергетическая освещенность поверхности $0,6 \text{ Вт/м}^2$.

5. По условию задачи 4 определить число фотонов, ежесекундно падающих на данную поверхность.

6. Определить давление на черную поверхность, создаваемое светом с длиной волны $0,4 \text{ мкм}$, если ежесекундно на 1 см^2 поверхности нормально падает $6 \cdot 10^{16}$ фотонов.

7. Световое давление, испытываемое зеркальной поверхностью, площадью 1 см^2 , равно 10^{-6} Па . Найти длину волны монохроматического света, если на поверхность ежесекундно падает $6 \cdot 10^{16}$ фотонов.

8. На зачерненную поверхность нормально падает монохроматический свет с длиной волны $0,45 \text{ мкм}$. Найти число фотонов, падающих на площадку 1 см^2 в 1 с , если давление, производимое этим светом, равно 10^{-5} Па .

9. Определить силу светового давления на зеркальную поверхность, площадью 100 см^2 , если энергетическая освещенность поверхности равна $2,5 \text{ кВт/м}^2$.

10. Давление нормально падающего на зеркальную поверхность света равно 10^{-8} Па . Определить мощность, расходуемую на излучение, если расстояние от источника света до поверхности равно 2 м .

11. Катод вакуумного фотоэлемента освещается светом с длиной волны $0,380 \text{ мкм}$. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной $1,4 \text{ эВ}$. Найти работу выхода электронов из катода.

12. Красная граница фотоэффекта для никеля равна $0,257$ мкм. Найти длину волны света, падающего на никелевый фотокатод, если фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной $1,5$ В.

13. Определить максимальную скорость электрона, вырванного с поверхности серебряной пластинки гамма-квантом с энергией $1,53$ МэВ.

14. На цинковую пластинку падает пучок ультрафиолетовых лучей с длиной волны $0,2$ мкм. Определить максимальную кинетическую энергию и максимальную скорость фотоэлектронов ($A = 4,0$ эВ).

15. На пластину падает монохроматический свет с длиной волны $0,42$ мкм. Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов, равной $0,95$ В. Определить работу выхода электронов с поверхности пластины.

16. Какую часть энергии фотона составляет энергия, пошедшая на работу выхода электронов из фотокатода, если красная граница для материала фотокатода равна $0,540$ мкм, кинетическая энергия фотоэлектрона равна $0,5$ эВ?

17. Кинетическая энергия электронов, выбитых из цезиевого фотокатода, равна 3 эВ. Определить, при какой максимальной длине волны света выбивается этот электрон. Работа выхода для цезия $1,8$ эВ.

18. Облучение литиевого фотокатода производится фиолетовыми лучами, длина волны которых равна $0,4$ мкм. Определить скорость фотоэлектронов, если красная граница фотоэффекта для лития равна $0,52$ мкм.

19. Фотон с длиной волны $0,2$ мкм вырывает с поверхности фотокатода электрон, кинетическая энергия которого равна 2 эВ. Определить работу выхода и красную границу фотоэффекта.

20. Для фотокатода, выполненного из вольфрама работа выхода равна $4,5$ эВ. Определить, при какой максимальной длине волны света происходит фотоэффект.

21. Фотон с энергией $1,3$ МэВ в результате эффекта Комптона был рассеян на свободном электроне. Определить длину волны рассеянного фотона, если угол рассеивания равен 60° .

22. Фотон с импульсом $0,544 \cdot 10^{-21}$ кг·м/с был рассеян на свободном электроне на угол 30° в результате явления Комптона. Определить импульс рассеянного фотона.

23. Фотон с энергией $0,51 \text{ МэВ}$ в результате комптоновского рассеивания отклонился на угол 180° . Определить энергию электрона отдачи.

24. По условию задачи 23 определить долю энергии, оставшуюся у рассеянного фотона и выразить ее в процентах.

25. В результате эффекта Комптона электрон приобрел энергию $0,5 \text{ МэВ}$. Определить энергию падающего фотона, если длина волны рассеянного фотона равна $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.

26. В результате комптоновского рассеивания на свободном покоящемся электроне длина волны гамма-фотона увеличилась в 2 раза. Найти кинетическую энергию и импульс электрона отдачи, если угол рассеяния равен 60° .

27. Гамма-фотон с энергией $1,02 \text{ МэВ}$ в результате комптоновского рассеяния на свободном электроне отклонился от первоначального направления на 90° . Определить кинетическую энергию и импульс электрона отдачи. До столкновения электрон покоился.

28. Первоначально покоившийся свободный электрон приобрел кинетическую энергию $0,06 \text{ МэВ}$ в результате комптоновского рассеяния на нем гамма-фотона с энергией $0,51 \text{ МэВ}$. Чему равен угол рассеяния фотона?

29. По условию задачи 28 найти длину волны фотона до и после рассеяния.

30. Угол рассеяния фотона с энергией $1,2 \text{ МэВ}$ на свободном электроне 60° . Найти длину волны рассеянного фотона и энергию электрона отдачи.

Качественные задачи

31. Как изменится вольт-амперная характеристика фотоэлемента, если не изменяя длины волны падающего света, увеличить световой поток?

32. Почему фотоэлектрические измерения весьма чувствительны к природе и состоянию поверхности фотокатода?

33. Как при заданной частоте света изменится фототок насыщения с уменьшением освещенности катода?

34. Как из опытов по фотоэффекту определяется постоянная Планка?

35. При замене одного металла другим длина волны, соответствующая красной границе, уменьшается. Что можно сказать о работе выхода этих металлов?

36. Почему существование красной границы в явлении фотоэффекта говорит в пользу корпускулярной теории света и против волновой?

37. Имеются электрически нейтральные пластинки из металла и полупроводника. При освещении металла возникает внешний фотоэффект, а при освещении полупроводника – внутренний. Останутся ли пластинки электрически нейтральными? Как это можно объяснить?

38. Может ли медная пластинка служить фотосопротивлением?

39. Объясните с точки зрения квантовой природы излучения безынерционность фотоэффекта.

40. Выразите энергию и импульс фотона через частоту и длину волны.

41. Почему отличается давление света на черную поверхность от давления на зеркальную?

42. Чему равно отношение давления света на зеркальную и зачерненную поверхности?

43. Докажите, что световое давление, оказываемое на поверхность тела потоком монохроматического излучения, падающего перпендикулярно поверхности, в случае идеального зеркала равно $2w$, а в случае полностью поглощающей поверхности равно w , где w – объемная плотность энергии излучения.

44. Как средство перемещения космического корабля в пределах Солнечной системы было предложено использовать световое давление, для чего потребовался бы большой парус из алюминиевой фольги. Оцените размеры такого паруса, чтобы сила давления света компенсировала силу притяжения к Солнцу.

45. Эффект Комптона наблюдается при рассеянии фотонов на слабосвязанных электронах. Какие электроны в веществе можно считать свободными?

46. Почему эффект Комптона не наблюдается при рассеянии видимого света?

47. Чему равно отношение импульса фотона к его частоте?

48. Опираясь на механизм комптоновского рассеяния, объясните почему длина волны рассеянного излучения больше, чем длина волны падающего излучения?

49. Следуя механизму комптоновского рассеяния, объясните присутствие в составе рассеянного излучения "несмещенной линии"?
50. Можно ли остановить световой луч?

Контрольные вопросы

1. Каковы основные положения квантовой теории света?
2. Почему световые кванты (фотоны) оказывают давление на поверхность тел?
3. Чем различаются внешний и внутренний фотоэффекты?
4. Что означает красная граница внешнего фотоэффекта?
5. Какое условие необходимо для возникновения внешнего фотоэффекта?
6. Запишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.
7. Как с помощью уравнения Эйнштейна объяснить I-й и II-й законы фотоэффекта?
8. От чего зависит скорость вылетающих электронов при внешнем фотоэффекте?
9. Объясните законы фотоэффекта с помощью световых квантов.
10. Приведите примеры применения фотоэффекта.
11. Зависит ли фототок от поляризации падающего света?
12. Почему выход фотоэлектронов при возникновении фотоэффекта не зависит от освещенности металла?
13. Почему в объяснении фотоэффекта существование пороговой частоты говорит в пользу фотонной теории, а не волновой?
14. В чем заключается эффект Комптона?
15. Поясните значение эффекта Комптона.
16. В чем отличие характера взаимодействия фотона и электрона при фотоэффекте и эффекте Комптона?
17. В чем состоит корпускулярно-волновой дуализм свойств света?
18. Какие экспериментальные подтверждения квантовых свойств света вы знаете?
19. Можно ли с помощью одного и того же измерительного прибора регистрировать и волновые, и квантовые свойства света?
20. Есть ли противоречия между волновой и квантовой теориями света?

Раздел VII. ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ МЕХАНИКУ

При решении задач этого раздела не следует забывать, что при скоростях, сравнимых со скоростью света, необходимо использовать релятивистские соотношения, а в задачах на применение соотношений неопределенностей Гейзенберга эти соотношения позволяют качественно описать многие закономерности движения микрочастиц.

Основные законы и формулы

Длина волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi(x) = 0$

Плотность вероятности $\frac{dw(x)}{dx} = |\psi(x)|^2$

Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2 $w = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx$

Соотношения неопределенности Гейзенберга для координаты и импульса, энергии и времени $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar ; \Delta E \Delta t \geq \hbar$

Импульс релятивистской частицы и его связь с кинетической энергией $p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2E_0)}$

Полная энергия частицы в прямоугольной яме шириной l $E = \frac{h^2 n^2}{8ml^2}$

Примеры решения задач

Пример 1. Кинетическая энергия электрона равна $1,02$ МэВ. Вычислить длину волны де Бройля этого электрона.

Дано: $E_k = 1,02$ МэВ = $16,2 \cdot 10^{-14}$ Дж; $E_0 = 0,51$ МэВ = $8,1 \cdot 10^{-14}$ Дж.

Найти: λ .

Решение: Длина волны де Бройля определяется по формуле $\lambda = \frac{h}{p}$, (1)

где λ – длина волны, соответствующая частице с импульсом p ; h – постоянная Планка.

По условию задачи кинетическая энергия электрона больше его энергии покоя: $E_k = 2E_0$, (2)

следовательно, движущийся электрон является релятивистской частицей. Импульс релятивистских частиц определяется по формуле

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2E_0)}, \quad (3)$$

или, учитывая соотношение (2),
$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + E_k)} = \frac{1}{c} E_k \sqrt{2}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1), получим
$$\lambda = \frac{hc}{E_k \sqrt{2}}.$$

Производя вычисления, получим

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{16,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \sqrt{2}} = 0,84 \cdot 10^{-12} \text{ м}.$$

Ответ: $\lambda = 0,84 \cdot 10^{-12}$ м.

Пример 2. Используя соотношения Гейзенберга, показать, что ядра атомов не могут содержать электронов. Считать радиус ядра равным 10^{-15} м.

Дано: $R_{\text{я}} = 10^{-15}$ м; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Найти: Δv_x .

Решение: Соотношение неопределенностей Гейзенберга выражается

формулой:
$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar = \frac{h}{2\pi},$$

где Δx – неопределенность координаты; Δp_x – неопределенность импульса; h – постоянная Планка. Если неопределенность координаты принять равной радиусу ядра, т.е. $\Delta x = R_{\text{я}}$, то неопределенность импульса электрона выразим следующим образом:

$$\Delta p_x = \frac{h}{2\pi \Delta x}.$$
 Так как

$\Delta p_x = m\Delta v_x$, то $m\Delta v_x = \frac{h}{2\pi\Delta x}$ и $\Delta v_x = \frac{h}{2\pi\Delta x \cdot m}$. Вычислим неопределенность скорости электрона:

$$\Delta v_x = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10^{-15} \text{ м} \cdot 6.28} = 1.158 \cdot 10^{11} \text{ м/с}.$$

Сравнивая полученное значение Δv_x со скоростью света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, видим, что $\Delta v_x > c$, а это невозможно, следовательно, ядра не могут содержать электронов.

Ответ: Ядра не содержат электроны.

Пример 3. Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной l на втором энергетическом уровне. В каких точках ямы плотность вероятности обнаружения частицы совпадает с классической плотностью вероятности?

Дано: l ; $\omega_n = \omega_\infty$; $n = 2$.

Найти: x .

Решение: Волновая функция, описывающая состояние частицы в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной l , имеет

$$\text{вид} \quad \psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n}{l} x, \quad (1)$$

где n – номер энергетического уровня ($n=1,2,3\dots$); x – координата частицы в яме ($0 \leq x \leq l$). Согласно физическому смыслу волновой функции, $|\psi|^2 = \omega$,

где ω – плотность вероятности обнаружения частицы в точке с координатой x . Если частица находится на втором энергетическом уровне

$$(n=2), \text{ то } \omega_2 = \frac{2}{l} \sin^2 \left(\frac{2\pi}{l} x \right). \quad (3)$$

Согласно принципу соответствия Бора выражение для классической плотности вероятности получается при $n \rightarrow \infty$:

$$\omega_\infty = \frac{1}{l}. \quad (4)$$

Приравнявая по условию задачи выражения (3) и (4), получаем

$$\sin^2 \left(\frac{\pi n}{l} x \right) = \frac{1}{2}. \quad (5)$$

$$\text{Решая уравнение (5), находим } x = \left(k \pm \frac{1}{4} \right) \frac{l}{2}, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (6)$$

В пределах потенциальной ямы ($0 \leq x \leq l$) таких точек четыре:

$$x = \left(\frac{l}{8}, \frac{3l}{8}, \frac{5l}{8}, \frac{7l}{8} \right).$$

Ответ: $x = \left(\frac{l}{8}, \frac{3l}{8}, \frac{5l}{8}, \frac{7l}{8} \right).$

Задачи для самостоятельного решения

1. Электрон прошел ускоряющую разность потенциалов U . Найти длину волны де Бройля для двух случаев: 1) $U_1 = 51 \text{ В}$; 2) $U_2 = 510 \text{ кВ}$.

2. Вычислить длину волны де Бройля электрона, движущегося со скоростью $v = 0,75c$ (c – скорость света в вакууме).

3. Определить кинетическую энергию протона и электрона, для которых длины волн де Бройля равны $0,06 \text{ нм}$.

4. Какой кинетической энергией должны обладать протоны, чтобы дебройлевская длина волны протона была равна его комптоновской длине волны.

5. Кинетическая энергия протона равна его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого протона.

6. Протон обладает кинетической энергией, равной энергии покоя. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля протона, если его кинетическая энергия увеличится в 2 раза?

7. Кинетическая энергия электрона равна энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.

8. Масса движущегося электрона в 2 раза больше массы покоя. Определить длину волны де Бройля для такого электрона.

9. Какой кинетической энергией должен обладать электрон, чтобы дебройлевская длина волны электрона была равна его комптоновской длине волны.

10. Определить длины волн де Бройля электрона и протона, прошедших ускоряющую разность потенциалов 400 В .

11. Среднее время жизни возбужденных состояний атома 10 нс . Вычислить естественную ширину спектральной линии ($\lambda = 0,7 \text{ мкм}$), соответствующую переходу между возбужденными уровнями атома.

12. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка 10 эВ . Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

13. Среднее время жизни возбужденного состояния атома равно 12 нс . Вычислить минимальную неопределенность длины волны $\lambda = 0,12 \text{ мкм}$ излучения при переходе атома в основное состояние.

14. Среднее время жизни π^0 -мезона равно $1,9 \cdot 10^{-16}$ с. Какова должна быть энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать π^0 -мезон?

15. На фотографии, полученной с помощью камеры Вильсона, ширина следа электрона составляет $0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Найти неопределенность в нахождении его скорости.

16. Средняя кинетическая энергия электрона в невозбужденном атоме водорода $13,6$ эВ. Используя соотношение неопределенностей, найти наименьшую погрешность, с которой можно вычислить координату электрона в атоме.

17. Электрон, движущийся со скоростью $8 \cdot 10^6$ м/с, зарегистрирован в пузырьковой камере. Используя соотношение неопределенностей, найти погрешность в измерении скорости электрона, если диаметр образовавшихся пузырька в камере 1 мкм.

18. Показать, что для частицы, неопределенность координаты которой $\Delta x = \frac{\lambda}{2\pi}$ (λ – длина волны де Бройля), неопределенность ее скорости равна по порядку величины самой скорости частицы.

19. Среднее время жизни π^+ -мезона равно $2,5 \cdot 10^{-8}$ с. Какова должна быть энергетическая разрешающая способность прибора, с помощью которого можно зарегистрировать π^+ -мезон?

20. Атом испустил фотон с длиной волны $0,55$ мкм. Продолжительность излучения 10 нс. Определить наибольшую погрешность, с которой может быть измерена длина волны излучения.

21. Определить ширину одномерной потенциальной ямы с бесконечно высокими стенками, если при переходе электрона с третьего энергетического уровня на второй излучается энергия 1 эВ?

22. Частица в потенциальной яме шириной l находится в возбужденном состоянии. Определить вероятность нахождения частицы в интервале $0 < x < \frac{l}{4}$ на втором энергетическом уровне.

23. Определить, при какой температуре дискретность энергии электрона, находящегося в одномерной потенциальной яме, ширина которой $2 \cdot 10^{-9}$ м, становится сравнимой с энергией теплового движения.

24. Электрон находится в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, ширина которой 1 нм. Определить наименьшую разность энергетических уровней электрона.

25. Электрон находится в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, ширина которой $1,4 \cdot 10^{-9}$ м. Определить энергию, излучаемую при переходе электрона с третьего энергетического уровня на второй.

26. Электрон находится в основном состоянии в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, ширина которой $0,1$ нм. Определить силу давления, оказываемую электроном на стенки ямы.

27. Электрон находится в основном состоянии в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, ширина которой $0,1$ нм. Определить импульс электрона.

28. Определить, при какой ширине одномерной потенциальной ямы дискретность энергии электрона становится сравнимой с энергией теплового движения при температуре 300 К.

29. Вычислить отношение вероятностей нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одномерной потенциальной ямы, ширина которой l , в интервале $0 < x < \frac{l}{4}$.

30. Частица в потенциальной яме шириной l находится в возбужденном состоянии. Определить вероятность нахождения частицы в интервале $0 < x < \frac{l}{2}$ на третьем энергетическом уровне.

Качественные задачи

31. Сравните длины волн де Бройля для электрона и шарика массой $m=1$ г, если их скорости одинаковы и равны $v=100$ м/с.

32. Как, исходя из соотношения неопределенностей, объяснить наличие естественной ширины спектральных линий?

33. Что определяет квадрат модуля волновой функции?

34. Какова наименьшая энергия частицы в "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками"?

35. Больше или меньше энергия частицы, находящейся в "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками", в состоянии с $n=3$ по сравнению с состоянием с $n=1$?

36. Может ли частица находиться на дне "потенциальной ямы"? Определяется ли это формой "ямы"?

37. Зависит ли распределение энергетических уровней от формы "потенциальной ямы"?

38. Можно ли, пользуясь соотношением неопределенностей, по известному импульсу фотона определить область его локализации?

39. Может ли атом водорода поглотить фотон, энергия которого превосходит энергию связи атома?

40. При какой скорости кинетическая энергия частицы равна ее энергии покоя?

41. Применяя к атому модель частицы в потенциальной яме, определить минимальную энергию электрона в атоме. Размеры атома принять равными 10^{-10} м.

42. Оцените энергию электрона для того, что бы он попал в ядро.

43. Объясните физический смысл соотношения неопределенности для энергии E и времени t .

44. Применяя соотношение неопределенностей, покажите, что для движущейся частицы, неопределенность координаты которой равна длине волны де Бройля, неопределенность скорости равна по порядку величины самой скорости частицы.

45. Объясните, почему физический смысл имеет не сама ψ -функция, а квадрат ее модуля $|\psi|^2$?

46. Объясните, почему волновая функция должна быть конечной, однозначной и непрерывной.

47. Известно, что свободная квантовая частица описывается плоской монохроматической волной де Бройля. Плотность вероятности (вероятность, отнесенная к единице объема) обнаружения свободной частицы $|\psi|^2 = |A|^2 = const$. Объясните, что означает постоянство этой величины.

48. Электрон находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной A в состоянии с минимальной энергией. Каким образом будет изменяться плотность вероятности обнаружения электрона в центре ямы с ростом энергии электрона ?

49. Что является решением уравнения Шредингера ?

50. Свободная частица в квантовой механике описывается плоской монохроматической волной с амплитудой A . Чему равна вероятность обнаружить частицу в точке пространства с координатами x, y, z ?

Контрольные вопросы

1. Приведите формулу де Бройля.

2. Каковы свойства волн де Бройля?
3. Физический смысл соотношений неопределенностей Гейзенберга.
4. С какой степенью точности можно говорить о траекториях микрочастиц?
5. Приведите соотношение неопределенностей для энергии и времени.
6. Статистический смысл волновой функции.
7. Что означает условия нормировки волновой функции?
8. Запишите уравнение Шредингера для стационарных состояний.
9. Запишите формулу энергии частицы в "потенциальной яме" с бесконечно высокими "стенками".
10. Что определяет главное квантовое число?
11. Как определить вероятность нахождения частицы в некотором интервале?
12. Записать уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона, находящихся в атоме водорода.
13. Условия, при которых уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона в атоме водорода имеет решение.
14. Что характеризуют квантовые числа?
15. Почему квантовая механика является статистической теорией?
16. Сформулируйте принцип причинности в квантовой механике.
17. Какие спектры излучения дают атомы водорода?
18. Что такое энергетический уровень?
19. Что называют потенциалом ионизации?
20. От чего зависит энергия электрона в атоме водорода?

Раздел VIII. ФИЗИКА АТОМОВ. АТОМНОЕ ЯДРО. РАДИОАКТИВНОСТЬ

При решении задач на радиоактивность и строение атома не следует путать понятия "полная энергия" и "энергия связи". Кроме того, необходимо видеть взаимозависимость массы и энергии частицы.

Основные законы и формулы

Коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра

$$\lambda = \frac{hc}{eU}$$

Формула Мозли
$$\frac{1}{\lambda} = R(Z - a)^2 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Закон поглощения излучения
веществом (формула Бугера)
$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

Массовое число ядра
(число нуклонов в ядре)
$$A = Z + N$$

Закон радиоактивного распада
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Число ядер, распавшихся за
время t
$$N_t = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

Дефект массы ядра
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_0 - m_n$$

Зависимость периода
полураспада от постоянной
радиоактивной распада
$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

Энергия связи ядра
$$\Delta E_{св} = \Delta mc^2; \quad \Delta E_{св} = 931 \Delta m$$

(где $\Delta E_{св}$ выражена в МэВ)

Примеры решения задач

Пример 1. Граничная длина волны K_α -серии характеристического рентгеновского излучения для некоторого элемента равна $0,0205$ нм. Определить этот элемент.

Дано: $\lambda_{K_\alpha} = 0,0205$ нм $= 0,205 \cdot 10^{-10}$ м; $i = 1$; $n = 2$; $a = 1$.

Найти: Z .

Решение: Из формулы Мозли
$$\frac{1}{\lambda} = R(Z - a)^2 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
, где λ – длина волны характеристического излучения, равная $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (c – скорость света, ν – частота, соответствующая длине волны λ); R – постоянная Ридберга; Z – порядковый номер элемента, из которого изготовлен электрод; a – постоянная экранирования; i – номер энергетического

уровня, на который переходит электрон; n – номер энергетического уровня, с которого переходит электрон (для K_α – серии $i = 1$, $n = 2$, $a = 1$). Учитывая приведенное, находим Z : $Z = \sqrt{\frac{4}{3\lambda R}} + 1$.

$$Z = \sqrt{\frac{4}{3 \cdot 0,205 \cdot 10^{-10} \text{ м} \cdot 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}}} + 1 = 78.$$

Порядковый номер 78 имеет платина.

Ответ: $Z=78$ (платина).

Пример 2. На поверхность воды падает узкий монохроматический пучок γ -лучей с длиной волны $0,775 \text{ нм}$. На какой глубине интенсивность γ -лучей уменьшится в 100 раз?

Дано: $\lambda = 0,775 \text{ нм} = 7,75 \cdot 10^{-13} \text{ м}$; $k = 100$.

Найти: x .

Решение: Ослабление интенсивности γ -лучей определяется по формуле $J = J_0 e^{-\mu x}$, (1)

откуда $\frac{1}{k} = \frac{J}{J_0} = e^{-\mu x}$, где J_0 – интенсивность падающего пучка γ -лучей;

J – их интенсивность на глубине x ; μ – коэффициент линейного ослабления. Решая уравнение (1) относительно x , находим

$$\ln(k) = \mu \cdot x; \quad x = \frac{\ln k}{\mu}. \quad (2)$$

Для определения μ вычислим энергию γ -квантов: $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, где

h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме. Подставляя числовые значения, получим:

$$\varepsilon = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{7,75 \cdot 10^{-13} \text{ м}} = 2,56 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,6 \text{ МэВ}.$$

По графику (смотри приложение) зависимости линейного коэффициента ослабления γ -лучей от их энергии находим $\mu = 0,06 \text{ см}^{-1}$. Подставляя это значение μ в формулу (2), находим $x = \frac{\ln 100}{0,06 \text{ см}^{-1}} = 76,75 \text{ см}$.

Ответ: $x=76,75 \text{ см}$.

Пример 3. Определить, сколько ядер в 1 г радиоактивного ${}_{38}^{90}\text{Sr}$ распадается в течении одного года.

Дано: $m = 10^{-3} \text{ кг}$; $T = 27 \text{ лет}$; $t = 1 \text{ год}$.

Найти: N_r .

Решение: Для определения числа атомов, содержащихся в $1 \text{ г } {}_{38}^{90}\text{S}_2$, используем соотношение $N = \nu N_A = \left(\frac{m}{M}\right) N_A$, (1)

где N_A – постоянная Авогадро; ν – число молей, содержащихся в массе данного элемента; M – молярная масса изотопа. Между молярной массой изотопа и его относительной атомной массой существует соотношение: $M = 10^{-3} A \text{ кг/моль}$. (2)

Для всякого изотопа относительная атомная масса весьма близка к его массовому числу A , т.е. для данного случая $M = 10^{-3} \cdot 90 \text{ кг/моль} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$.

Используя закон радиоактивного распада $N = N_0 e^{-\lambda t}$, (3) где N_0 – начальное число не распавшихся ядер в момент $t = 0$; N – число не распавшихся ядер в момент t ; λ – постоянная радиоактивного распада.

Определим количество распавшихся ядер ${}_{38}^{90}\text{S}_2$ в течение 1 года:

$$N_t = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}). \quad (4)$$

Учитывая, что постоянная радиоактивного распада связана с периодом полураспада соотношением $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$, получим

$$N_t = N_0(1 - e^{-(\ln 2/T)t}). \quad (5)$$

Подставляя (1) с учетом (2) в выражение (5), имеем

$$N_t = N_A \frac{m}{10^{-3} A} (1 - e^{-(\ln 2/T)t}). \quad (6)$$

Произведя вычисления по формуле (6), найдем

$$N_t = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \frac{10^{-3} \text{ кг}}{10^{-3} \cdot 90 \text{ кг/моль}} (1 - e^{-0,693 \cdot 1 \text{ год} / 27 \text{ лет}}) = 6,4 \cdot 10^{21}.$$

Ответ: $N_t = 6,4 \cdot 10^{21}$.

Пример 4. Вычислить в мегаэлектронвольтах энергию ядерной реакции: ${}_{27}^{59}\text{Co} + {}_0^1n \rightarrow {}_{27}^{60}\text{Co} + \gamma$.

Выделяется или поглощается энергия при этой реакции?

Решение: Энергия ядерной реакции равна $\Delta E = \Delta m c^2$, (1)

где Δm – дефект масс реакции; c – скорость света в вакууме. Если Δm выражается в а.е.м., то формула (1) принимает вид $\Delta E = 931 \Delta m$. Дефект массы равен $\Delta m = \left[\left(m_{{}_{27}^{59}\text{Co}} + m_{{}_0^1n} \right) - m_{{}_{27}^{60}\text{Co}} \right]$.

Так как число электронов до и после реакции сохраняется, то вместо значений масс ядер воспользуемся значениями масс нейтральных атомов, которые приводятся в справочных таблицах:

$$m_{27}^{59}\text{Co} = 58,95182 \text{ а.е.м.}; m_{0n}^1 = 1,00867 \text{ а.е.м.}; m_{27}^{60}\text{Co} = 59,95250 \text{ а.е.м.};$$

$$\Delta m = (59,96075 - 59,9525) \text{ а.е.м.} = 0,00825 \text{ а.е.м.}$$

Реакция идет с выделением энергии, так как $\Delta m > 0$.

$$\Delta E = 931 \text{ МэВ} / \text{а.е.м.} \cdot 0,00825 \text{ а.е.м.} = 7,66 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $\Delta E = 7,66 \text{ МэВ}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Вычислить толщину слоя половинного ослабления при условии, что узкий пучок γ -излучения с энергией $1,25 \text{ МэВ}$ проходит через свинцовый экран.

2. Определить, как изменится интенсивность узкого пучка γ -лучей при прохождении через экран, состоящий из двух плит: алюминиевой – толщиной 10 см и железной – толщиной 5 см . Коэффициент линейного ослабления для Al $\mu = 0,1 \text{ см}^{-1}$, а для Fe $\mu = 0,3 \text{ см}^{-1}$.

3. Как изменится степень ослабления γ -лучей при прохождении через свинцовый экран, если длина волны этих лучей $0,0041 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ и $0,0082 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, толщина экрана 1 см .

4. Вычислить толщину слоя половинного ослабления для свинцового экрана, через который проходит монохроматический узкий пучок γ -лучей с длиной волны $0,006 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

5. Какова энергия γ -лучей, если при прохождении через слой железа толщиной в $3,15 \text{ см}$ интенсивность излучения ослабевает в 4 раза?

6. Найти граничную длину волны K -серии рентгеновского излучения от платинового антикатада.

7. При каком наименьшем напряжении на рентгеновской трубке с железным антикатодом появляются линии K -серии?

8. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к рентгеновской трубке с вольфрамовым антикатодом, чтобы в спектре излучения вольфрама были все линии K -серии?

9. Граничная длина волны K -серии характеристического рентгеновского излучения некоторого элемента равна $0,1284 \text{ нм}$. Определить этот элемент.

10. Определить минимальную длину волн тормозного рентгеновского излучения, если к рентгеновской трубке приложены напряжения 30 кВ ; 75 кВ .

11. Период полураспада радиоактивного аргона ${}_{18}^{41}\text{Ar}$ равен 110 мин . Определить время, в течение которого распадается 25% начального количества атомов.

12. Вычислить толщину слоя половинного поглощения свинца, через который проходит узкий монохроматический пучок γ -лучей с энергией $1,2 \text{ МэВ}$.

13. Период полураспада изотопа ${}_{27}^{60}\text{Co}$ равен примерно $5,3 \text{ года}$. Определить постоянную распада и среднюю продолжительность жизни атомов этого изотопа.

14. На железный экран падает узкий монохроматический пучок γ -лучей, длина волны которых $0,124 \cdot 10^{-2} \text{ нм}$. Найти толщину слоя половинного поглощения железа.

15. Какова энергия γ -лучей, если при прохождении через слой алюминия толщиной 5 см интенсивность излучения ослабевает в 3 раза?

16. Период полураспада ${}_{27}^{60}\text{Co}$ равен $5,3 \text{ года}$. Определить, какая доля первоначального количества ядер этого изотопа распадется через 5 лет.

17. Рассчитать толщину защитного водяного слоя, который ослабляет интенсивность γ -излучения с энергией $1,6 \text{ МэВ}$ в 5 раз.

18. За год распалось 60% некоторого исходного радиоактивного элемента. Определить период полураспада этого элемента.

19. Через экран, состоящий из двух плит: свинцовой – толщиной 2 см и железной – толщиной 5 см , проходит узкий пучок γ -лучей с энергией 3 МэВ . Определить, во сколько раз изменится интенсивность γ -лучей при прохождении этого экрана.

20. Определить постоянную распада и число атомов радона, распавшихся в течение суток, если первоначальная масса радона 10 г .

21. Вычислить энергию ядерной реакции ${}^2_1\text{H} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2{}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

22. Какое количество энергии освобождается при соединении одного протона и двух нейтронов в атомное ядро?

23. При термоядерном взаимодействии двух дейтронов возможны образование двух типов: 1) ${}^3_2\text{He}$; 2) ${}^3_1\text{H}$. Определить тепловые эффекты этих реакций.

24. Ядро, состоящее из 92 протонов и 143 нейтронов, выбросило α -частицу. Какое ядро образовалось в результате α -распада? Определить дефект массы и энергию связи образовавшегося ядра.

25. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для элемента ${}_{12}^{24}\text{Mg}$.

26. Определить максимальную кинетическую энергию электрона, вылетающего при β -распаде нейтрона. Написать уравнение распада.

27. Определить максимальную энергию β -частиц при β -распаде трития. Написать уравнение распада.

28. В какой элемент превращается ${}_{92}^{238}\text{U}$ после трех α -распадов и двух β -превращений?

29. Вычислить энергию термоядерной реакции ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

30. Вычислить дефект массы, энергию связи ядра и удельную энергию связи для элемента ${}_{47}^{108}\text{Ag}$.

Качественные задачи

31. Для ионизации атома водорода требуется энергия 13,6 эВ. Одинаковой ли начальной кинетической энергией должны обладать электрон, ион водорода и ион гелия, чтобы ионизировать атом водорода?

32. Как изменяется энергия электрона в атоме водорода при увеличении главного квантового числа n ?

33. Электрон, двигаясь в атоме, испытывает со стороны ядра кулоновскую силу притяжения. Можно ли создать внешнее электрическое поле, способное преодолеть эту силу и ионизировать атом водорода?

34. Какие частицы образуют ядро атома цинка? Сколько их?

35. Почему прочность ядер уменьшается при переходе к тяжелым элементам?

36. Как и во сколько раз изменится число ядер радиоактивного вещества за время, равное трем периодам полураспада?

7. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после двух α -распадов ядер его атомов?

38. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после последовательных одного α -распада и двух β -распадов ядер его атомов?

39. Объясните непрерывность энергетического спектра β -частиц.
40. Изменится ли химическая природа элемента при испускании его ядром γ -кванта?
41. При радиоактивном распаде излучаются α -частицы, электроны и фотоны. Всегда ли естественный радиоактивный распад ядер сопровождается излучением такого состава?
42. Под действием каких частиц (α -частиц, нейтронов) ядерные реакции более эффективны?
43. В результате какой реакции происходит превращение ядер ${}_{92}^{238}\text{U}$ в ядра ${}_{94}^{239}\text{Pu}$?
44. Почему деление тяжелых ядер и синтез атомных ядер сопровождаются выделением большого количества энергии?
45. Приведите аргументы, показывающие, что в составе ядра не может быть электронов.
46. Как доказать зарядовую независимость ядерных сил?
47. Почему γ -излучение не следует считать типом радиоактивности?
48. Какие физические процессы используются для регистрации элементарных частиц?
49. Чем обусловлена потеря энергии α -частицами при их движении в воздухе?
50. При изучении излучения радиоактивного препарата были обнаружены α -частицы с двумя различными длинами пробега. Какое заключение можно сделать из этого факта?

Контрольные вопросы

1. Какие частицы входят в состав ядра атома?
2. Какие размеры имеет ядро?
3. Что такое дефект масс?
4. Что называют энергией связи ядра атома?
5. Что такое удельная энергия связи ядра?
6. Какие силы действуют между нуклонами в ядре?
7. Опишите основные модели ядра.
8. В чем заключается явление радиоактивности?
9. Приведите и объясните формулу радиоактивного распада.
10. Какие существуют радиоактивные семейства?
11. Опишите процессы α -, β -, γ -распадов?

12. Какие явления сопровождают прохождения γ -излучения через вещество и в чем их суть?
13. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
14. Физический смысл активности радиоактивного препарата.
15. Какие ядра наиболее стабильны?
16. Опишите реакцию деления тяжелых ядер.
17. По каким признакам можно классифицировать ядерные реакции?
18. В чем заключается термоядерный синтез?
19. Какие ускорители частиц существуют?
20. Какие методы используют для регистрации частиц?

ПРИЛОЖЕНИЕ

СИСТЕМА СИ

В России, согласно Государственному стандарту (ГОСТ 8.417-81), обязательна к применению Система Интернациональная (СИ), содержащая семь основных единиц измерения физических величин: *метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела* и две дополнительные: *радиан и стерадиан*.

Метр (м) – длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299792458$ с.

Килограмм (кг) – масса, равная массе международного прототипа килограмма (платиноиридиевый цилиндр, хранящийся в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа).

Секунда (с) – время, равное $2\ 192\ 631\ 770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер (А) – сила не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным, прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, создает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Кельвин (К) – $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль (моль) – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода $^{12}_6\text{C}$ массой $0,012$ кг.

Кандела (кд) – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Радян (рад) – угол между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Стерadian (ср) – телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающей на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ

$$1 \text{ Ангстрем } (\text{Å}) = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ рад} = 57,3^\circ$$

$$1 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1,33 \cdot 10^2 \text{ Па}$$

$$0 \text{ К} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЧИСЕЛ

$$\pi = 3,1415927$$

$$e = 2,7192818$$

$$\ln 2 = 0,6931472$$

$$\ln 10 = 2,3025851$$

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Постоянная	Значение
Гравитационная постоянная	$6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$
Скорость света в вакууме	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Планка	$6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$

МАССЫ АТОМОВ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Изотоп	Символ	Масса а. е. м.	Изотоп	Символ	Масса а. е. м.
Водород	${}^1_1\text{H}$	1,00783	Бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,01294
Дейтерий	${}^2_1\text{H}$	2,01410	Бор	${}^{11}_5\text{B}$	11,00690
Тритий	${}^3_1\text{H}$	3,01605	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
Гелий	${}^3_2\text{He}$	3,01603	Углерод	${}^{13}_6\text{C}$	13,00335
Гелий	${}^4_2\text{He}$	4,00260	Углерод	${}^{14}_6\text{C}$	14,00324
Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,01513	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
Литий	${}^7_3\text{Li}$	7,01601	Кисло- род	${}^{15}_8\text{O}$	15,99491
Бериллий	${}^9_4\text{Be}$	9,01219	Кисло- род	${}^{16}_8\text{O}$	16,99913

МАССА И ЭНЕРГИЯ ПОКОЯ ЧАСТИЦ

Частица	m_0 , кг	m_0 , а. е. м.	W_0 , Дж	W_0 , МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,53 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α - частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-11}$	3733

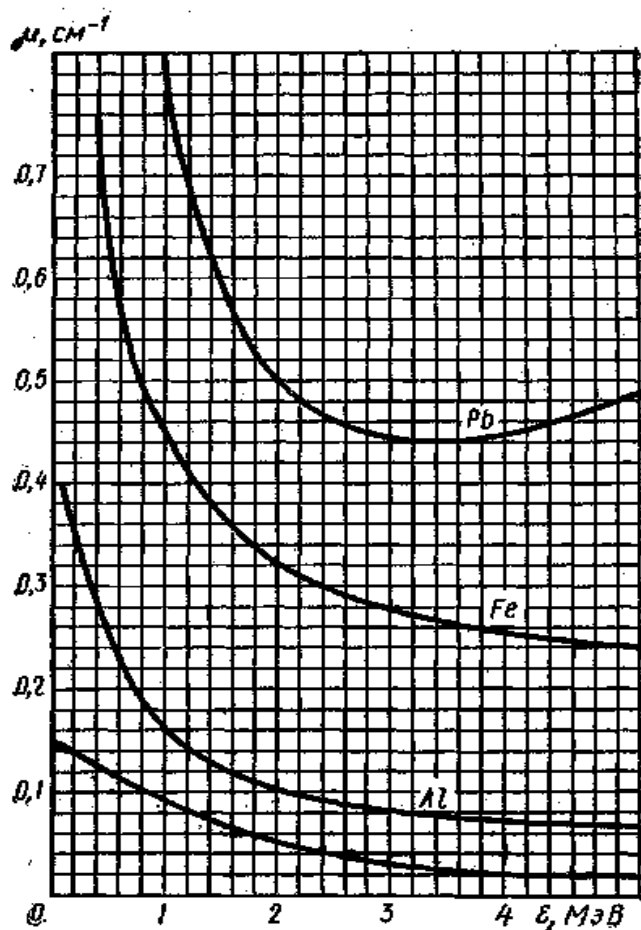
ПЕРИОДЫ ПОЛУРАСПАДА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Изо- топ	Символ	$T_{1/2}$	Изотоп	Символ	$T_{1/2}$
Акти- ний	${}^{225}_{89}\text{Ac}$	10 дней	Радон	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	3,8 дней
Ко- бальт	${}^{60}_{27}\text{Co}$	5,3 года	Стронций	${}^{90}_{38}\text{Sr}$	27 лет

ПЕРИОДЫ ПОЛУРАСПАДА РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

Маг-ний	$^{27}_{12}\text{Mg}$	10 мин	Фосфор	$^{32}_{15}\text{P}$	14,3 дней
Радий	$^{226}_{86}\text{Ra}$	1620 лет	Церий	$^{144}_{58}\text{Ce}$	285 дней

ЗАВИСИМОСТЬ ЛИНЕЙНОГО КОЭФФИЦИЕНТА μ ОСЛАБЛЕНИЯ γ -ЛУЧЕЙ ОТ ЭНЕРГИИ ε КВАНТОВ



ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2002. – 544 с.
2. Трофимова, Т.И. Краткий курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2000. – 352 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т. 1-5 / И.В. Савельев. – М.: ООО "Изд-во Астрель"; ООО "Изд-во АСТ", 2003. – 336 с.
4. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высш. шк., 1999. – 608 с.
5. Грабовский, Р.И. Курс физики / Р.И. Грабовский. – СПб.: Изд-во "Лань", 2002. – 608 с.
6. Трофимова, Т.И., Сборник задач по курсу физики с решениями / Т.И. Трофимова, З.Г. Павлова. – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.
7. Новодворская, Е.М. Сборник задач по физике с решениями для втузов / Е.М. Новодворская, Э.М. Дмитриев. – М.: ООО "Изд. дом "Оникс 21 век", 2003. – 368 с.
8. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука, 1985. – 582 с.
9. Физика: Метод. указания и контрольные задания /Под ред. В.С. Чертова. – М.: Высш. шк., 1981. – 176 с.
10. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1985. – 512 с.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 11.2004. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Офсетная печать. Объем п.л. Тираж 110 экз. Заказ №

Издательство Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117

Ф И З И К А
ПРАКТИКУМ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВУЗОВ

Сергей Валентинович Мисюль

Редактор *В.А.Сорокина*

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 11.2004. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Офсетная печать. Объем п.л. Тираж 110 экз. Заказ №

Издательство Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117